Pilha de execução

Volnys Borges Bernal

volnys@lsi.usp.br

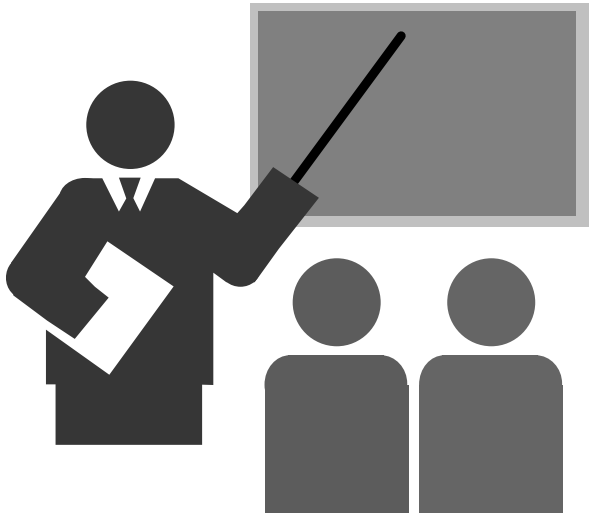
Depto. de Eng. de Sistemas Eletrônicos (PSI)

Escola Politécnica da USP

Agenda

- Os desafios da execução de subrotinas
- Pilha de execução
  - Controle do endereço de retorno da função
  - Passagem dos valores dos argumentos da função
  - Alocação de variáveis locais
- Quadro da pilha de execução

Os desafios da execução de subrotinas

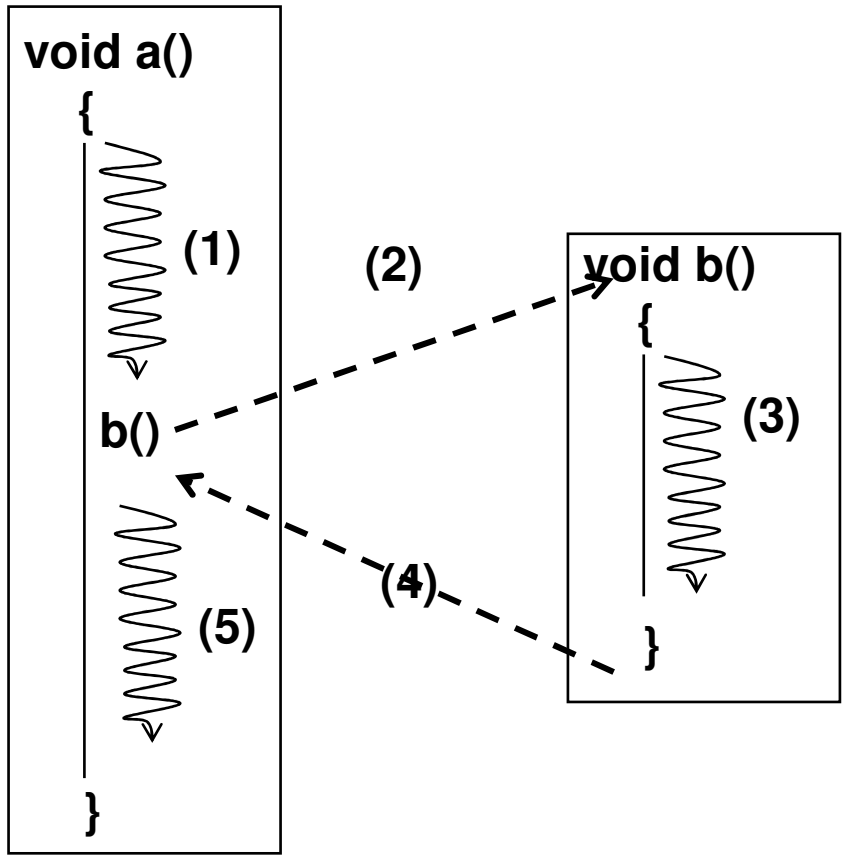


Os desafios da execução de subrotinas

1 - Retorno de subrotina (função)

- Quando uma subrotina (função) é ativada, o controle da execução deve ser transferido para a instrução inicial da subrotina.

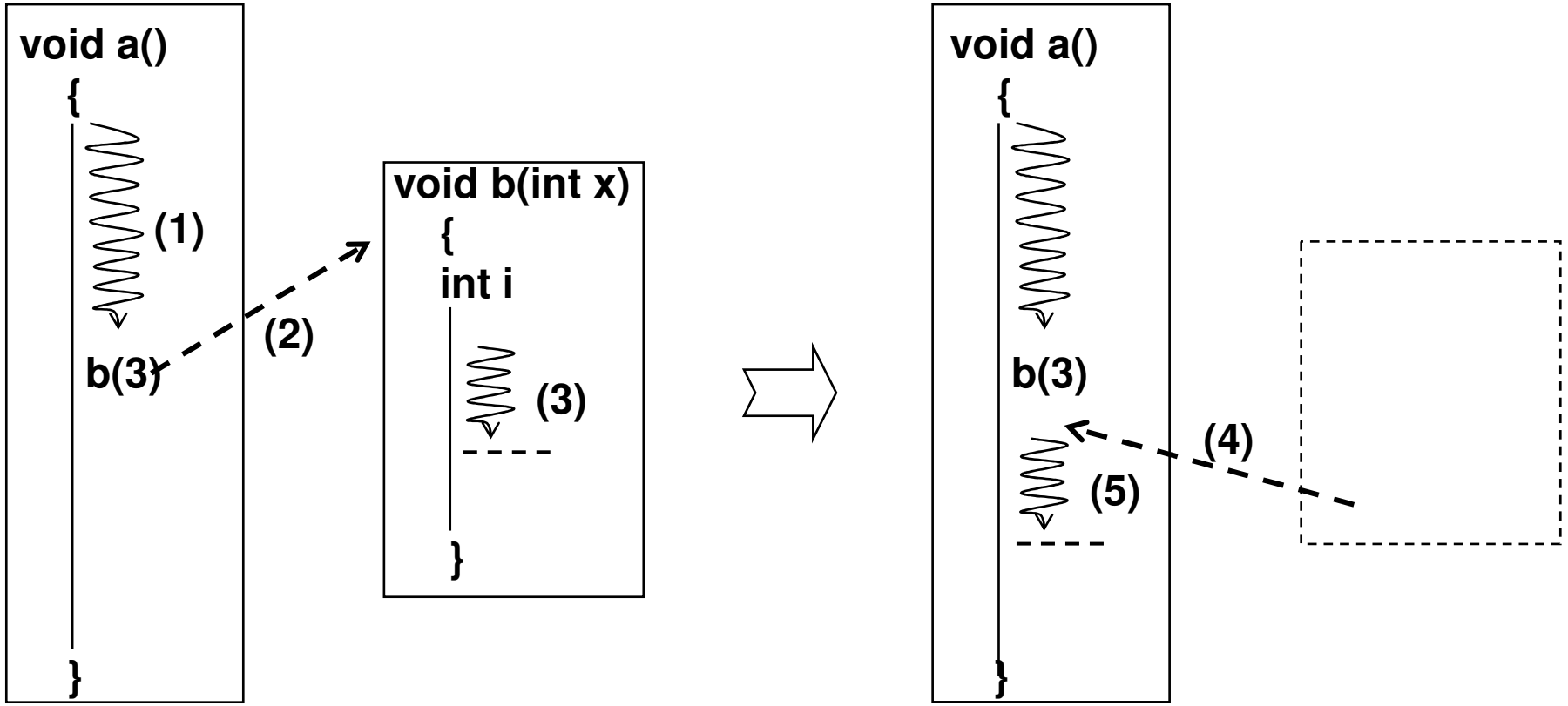
- Ao termino da subrotina, a próxima instrução a ser executada deve ser a instrução posterior à instrução que ativou a subrotina



Os desafios da execução de subrotinas

2 – Variáveis locais

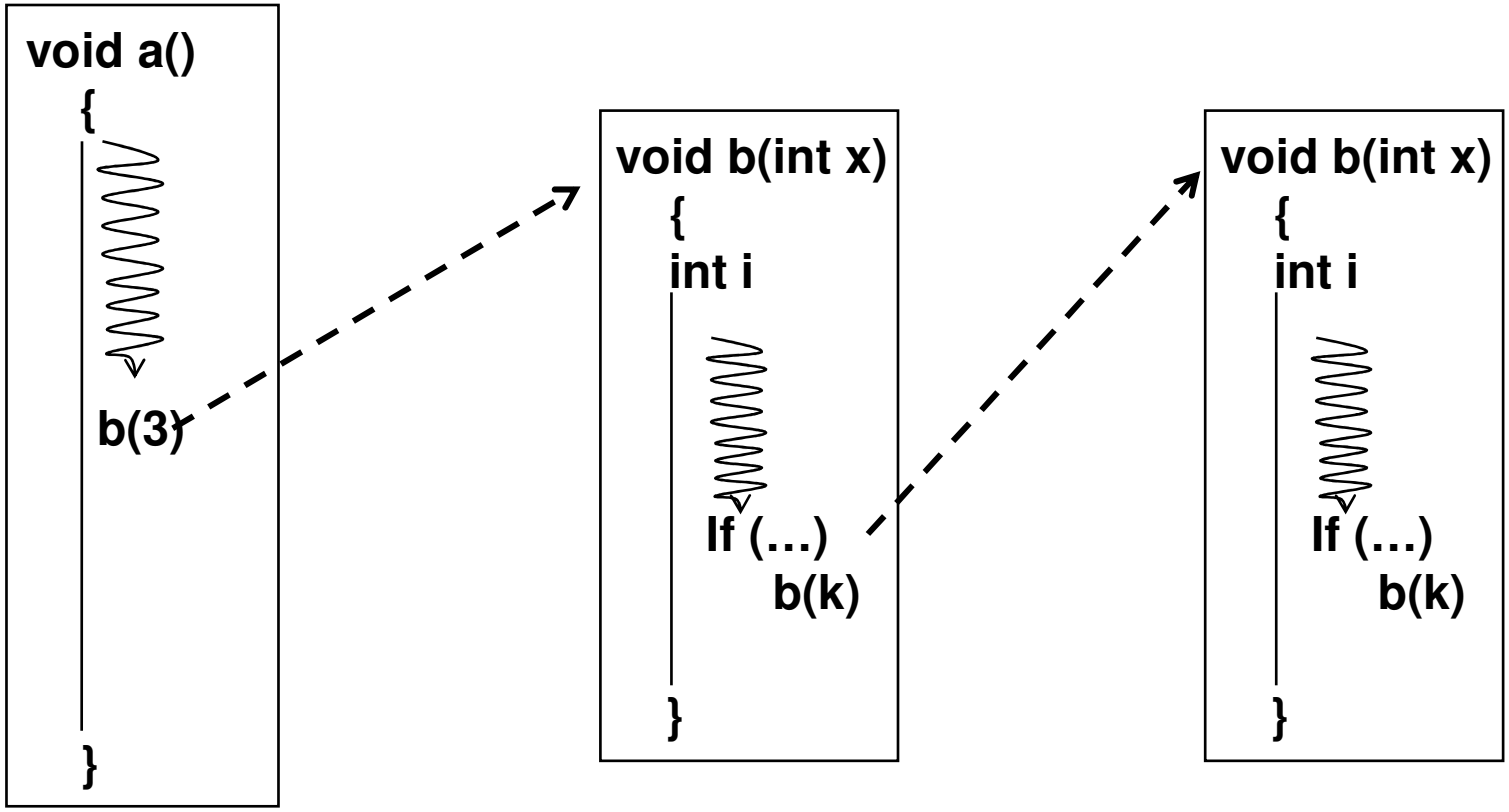
- As variáveis locais e parâmetros passados para a função devem existir somente enquanto durar a execução da função.



Os desafios da execução de subrotinas

3 – Instâncias independentes

- Cada instância de uma subrotina deve possuir suas próprias instâncias de variáveis locais e parâmetros.



Pilha de execução

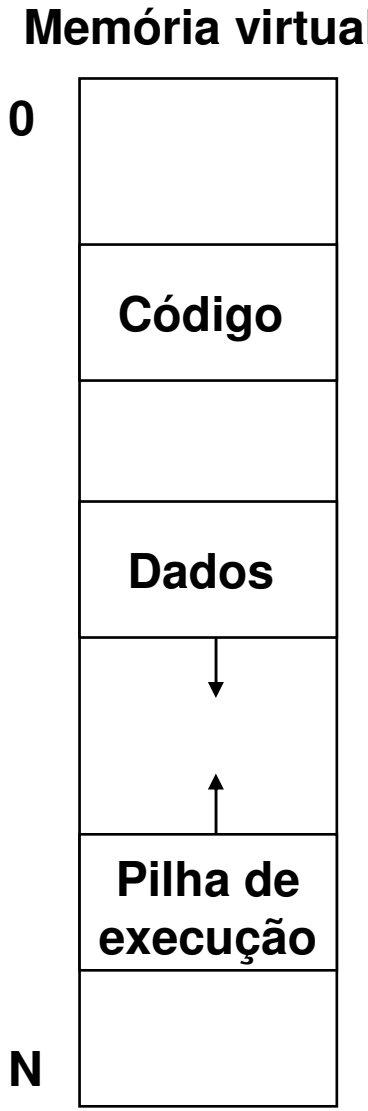
Pilha de execução

- **Finalidade**
  - **Realizar o controle da execução de subrotinas de um programa:**
    1. Controle do endereço de retorno da função;
    2. Passagem dos valores dos argumento da função;
    3. Alocação de variáveis locais à função.

- **Descrição**
  - **Espaço de memória especialmente reservado para organização de uma pilha de quadros (frame) de ativação (ou registro de ativação).**
  - **Cada quadro (frame) corresponde ao controle da ativação de uma função;**
  - **Esta pilha de quadros é usada como memória auxiliar durante a execução do programa**

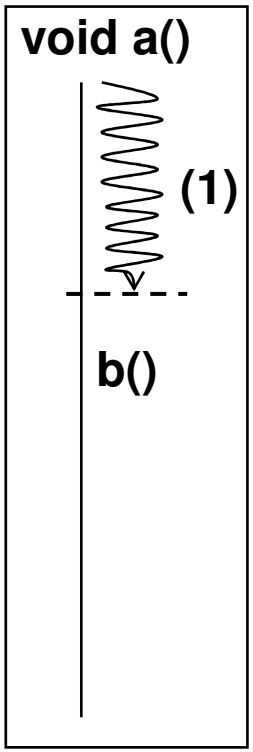
Pilha de execução

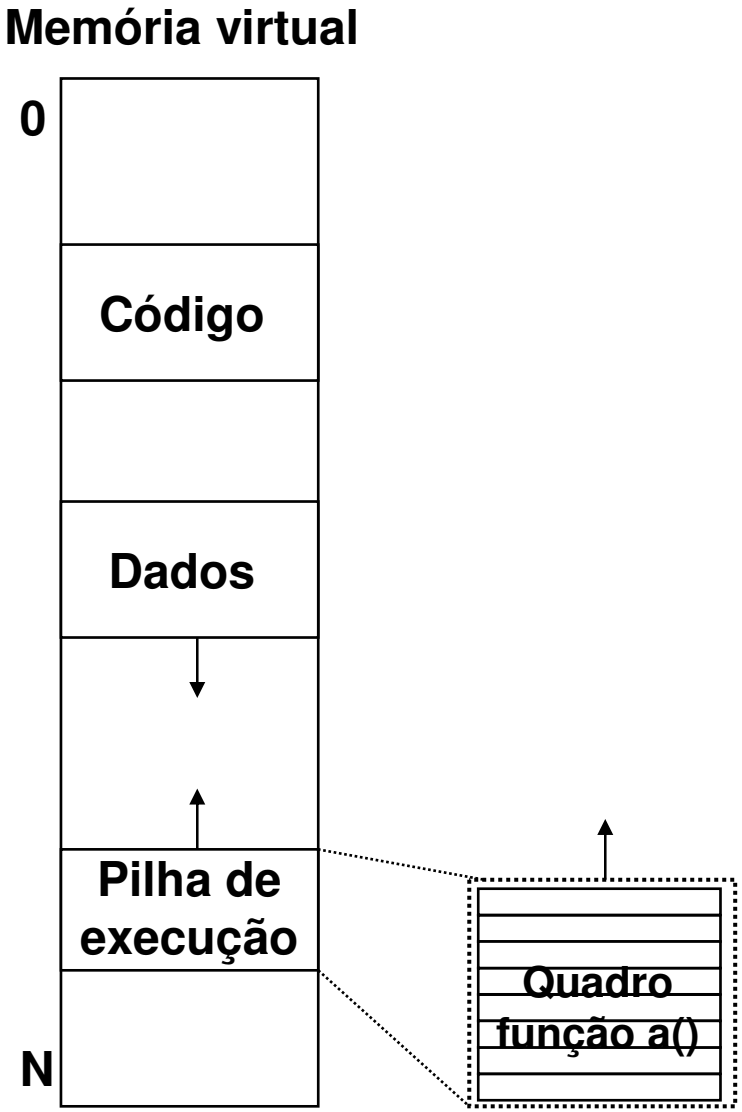
- Uma área exclusiva para a pilha de execução é reservada na memória virtual.
- A cada subrotina ativada, um "quadro" (frame) é criado na pilha de execução.



Pilha de execução

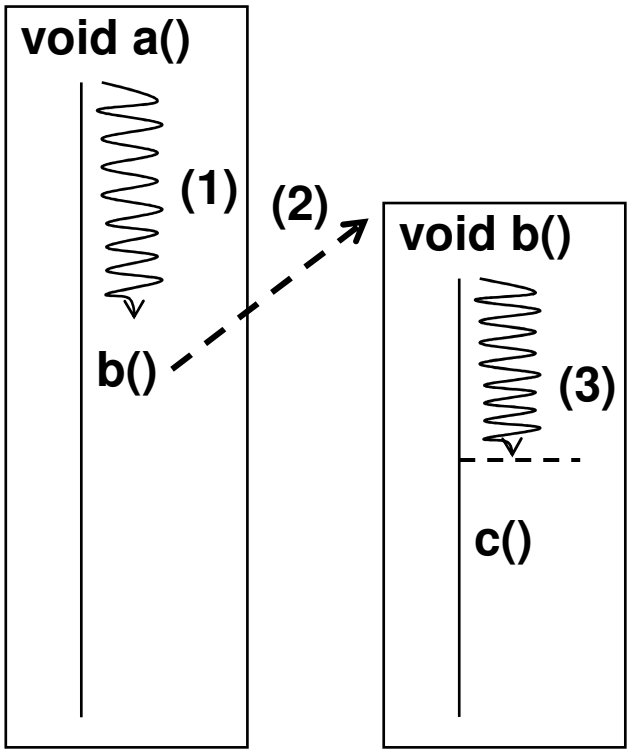
- **Exemplo**

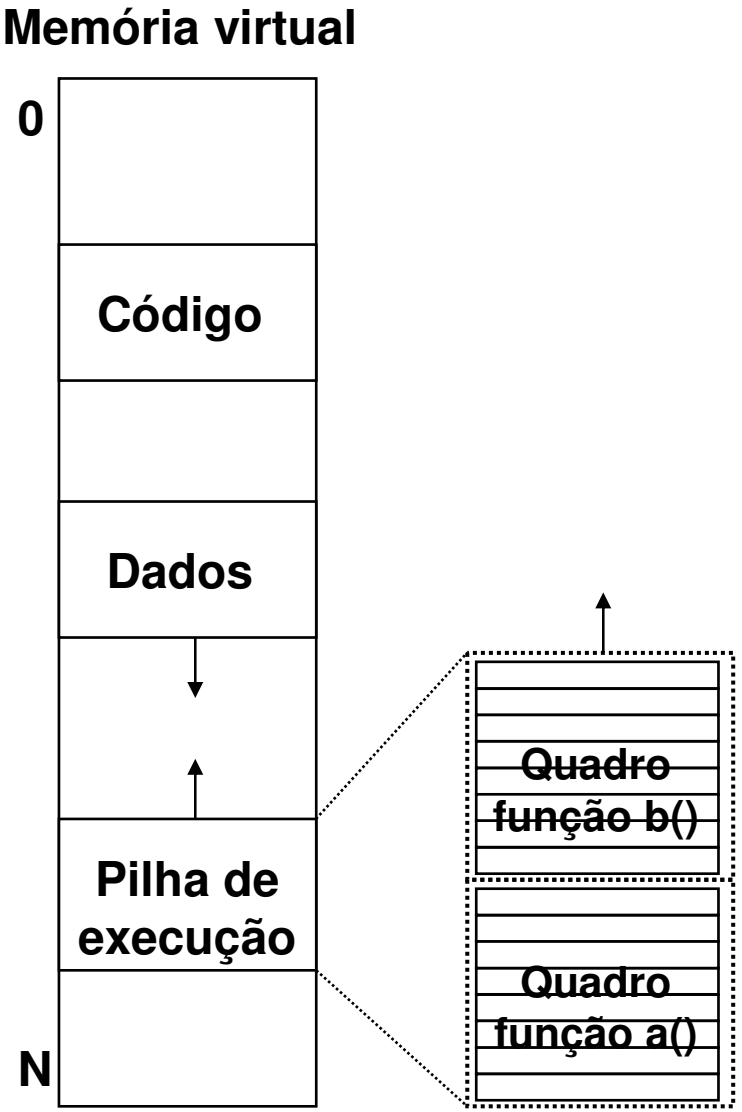




Pilha de execução

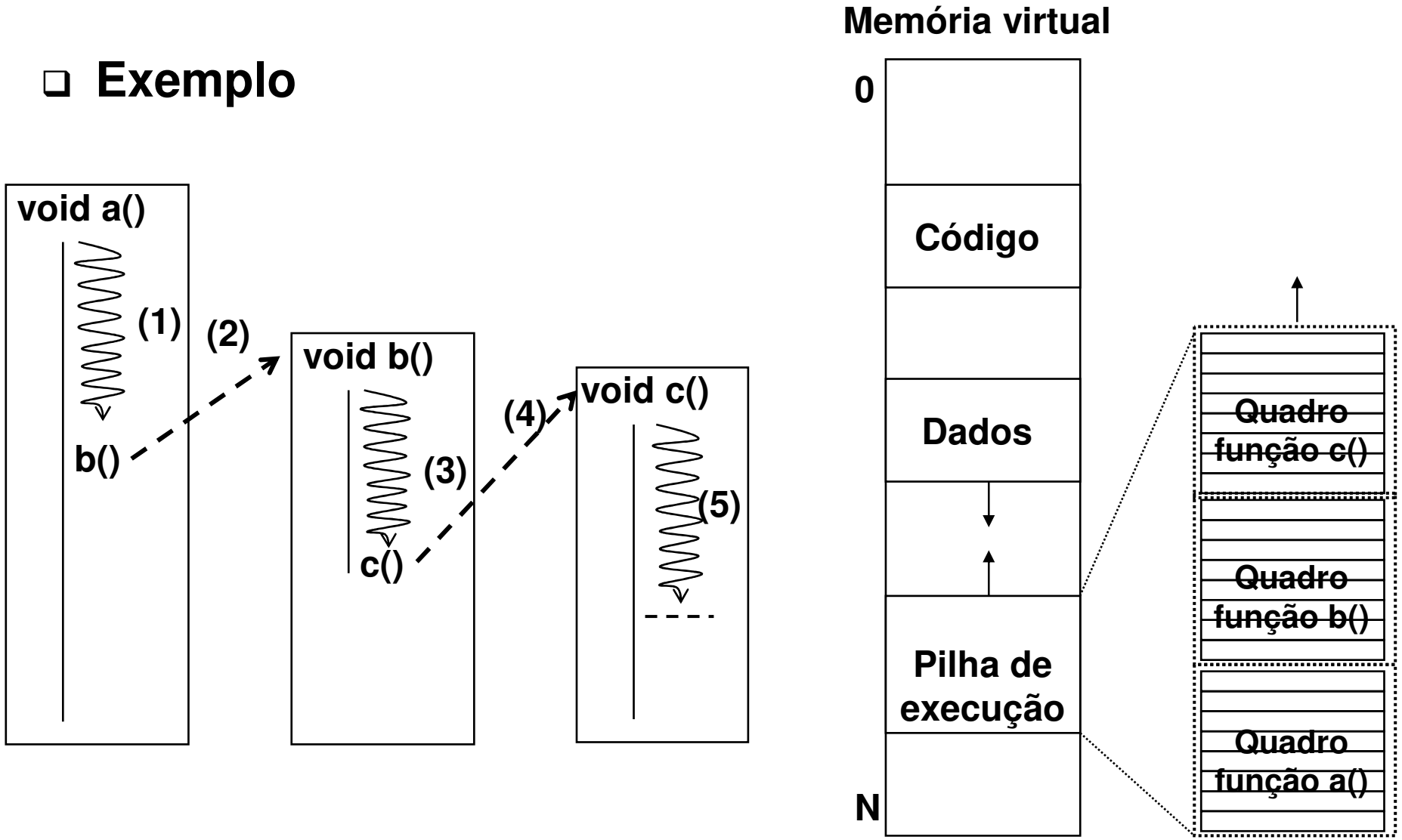
- Exemplo





Pilha de execução

- Exemplo



Pilha de execução

- **Suporte pelo processador**

  - **Instruções especiais para subrotinas:**
    - CALL – Chamada de subrotina:
      - Desvia o controle para uma subrotina salvando o endereço de retorno (endereço da próxima instrução) no topo da pilha.
    - RET - Retorno de uma subrotina:
      - O controle do programa (PC) é transferido para o valor desempilhando do topo da pilha

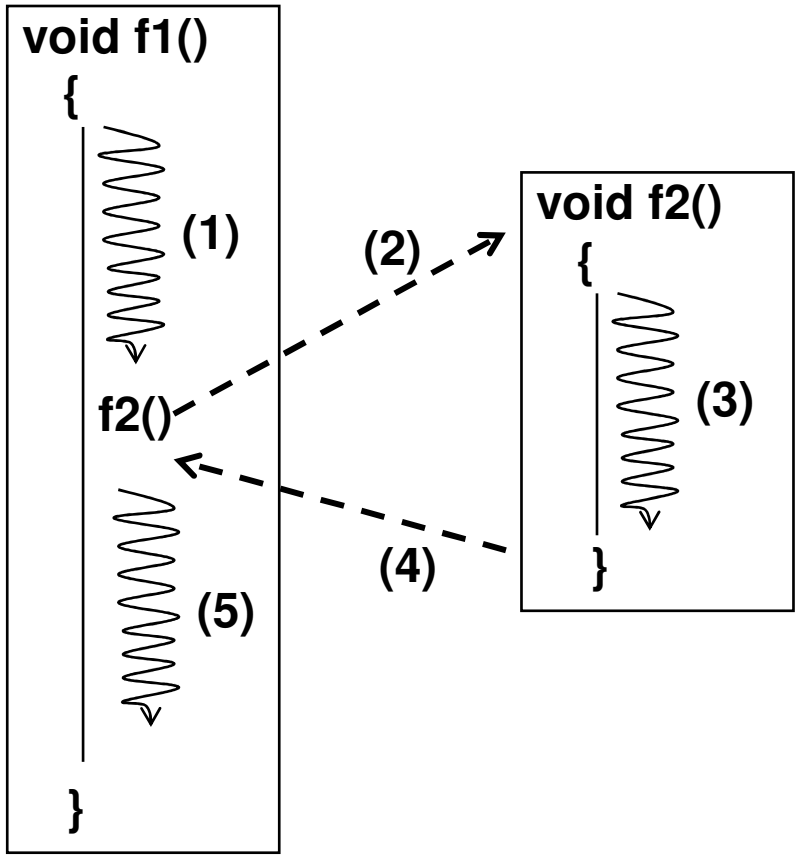
  - **Registradores especiais para controle da pilha de execução:**
    - SP (*stack pointer*): Contém o endereço do topo da pilha de execução

Controle do endereço de retorno da função

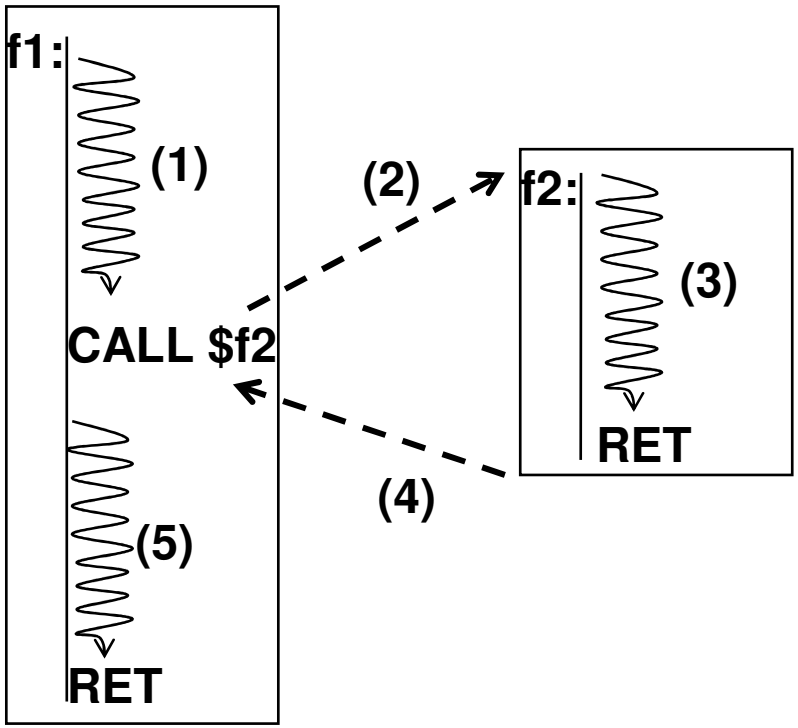
Controle do endereço de retorno

- Realizado pelas instruções CALL e RET

Programa em C

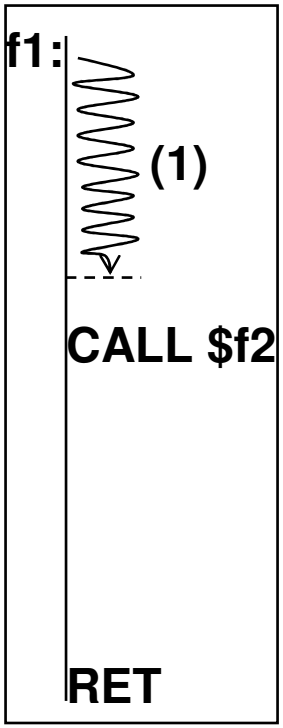


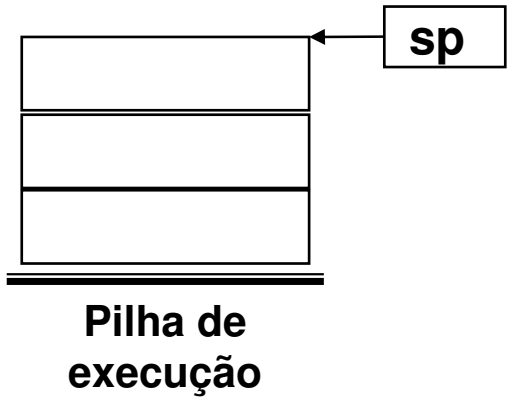
Programa em assembler



Controle do endereço de retorno

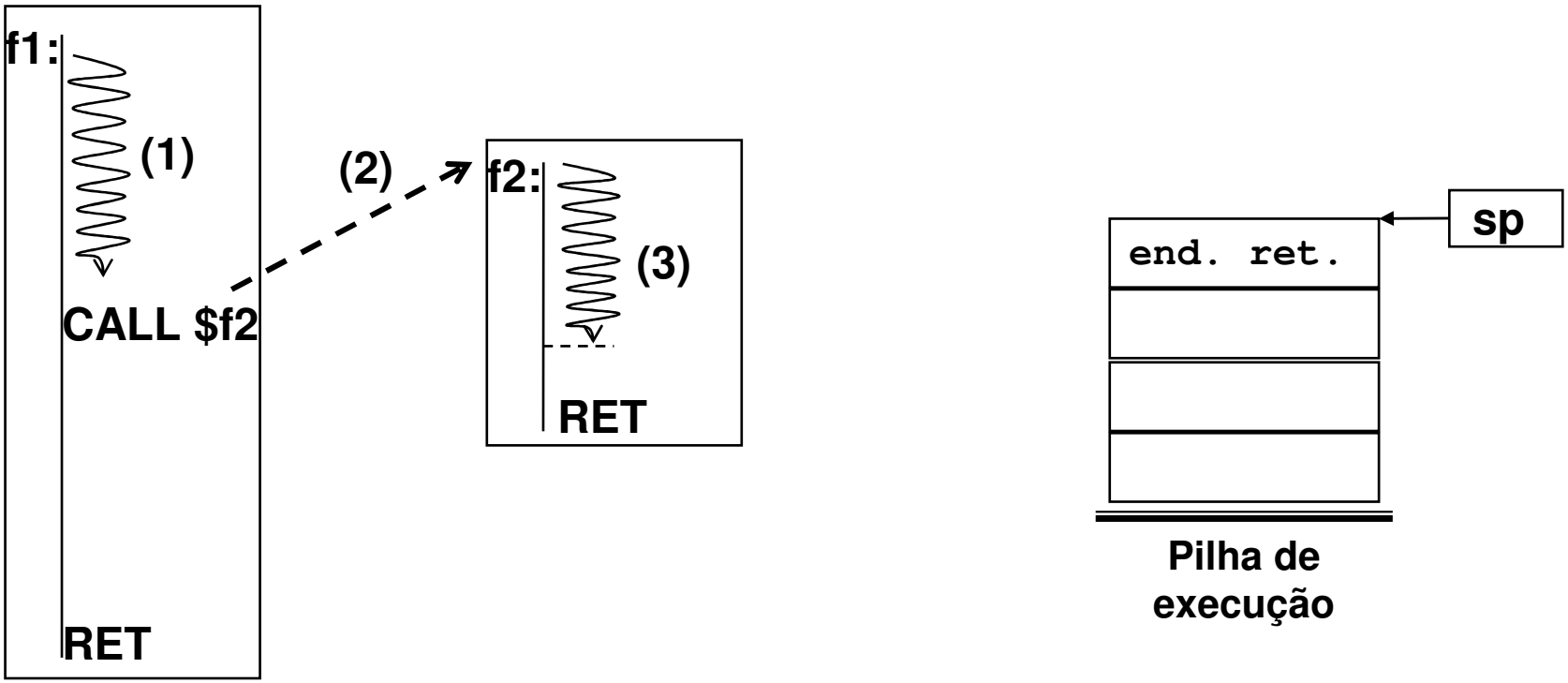
- Exemplo de funcionamento das instruções CALL e RET





Controle do endereço de retorno

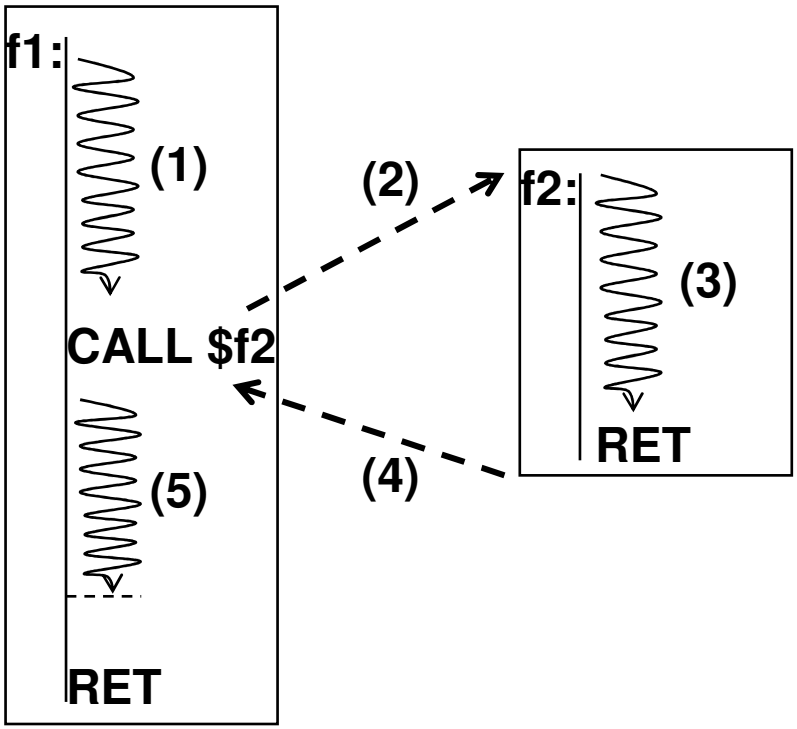
- **Exemplo de funcionamento das instruções CALL e RET**

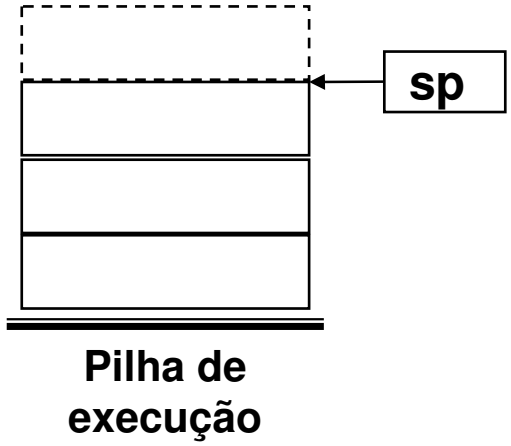


A instrução CALL salva o endereço de retorno (endereço da instrução após CALL) na pilha de execução e transfere o controle para f2.

Controle do endereço de retorno

- **Exemplo de funcionamento das instruções CALL e RET**





A instrução RET retira o valor contido no topo da pilha de execução (endereço de retorno) e transfere o controle para o endereço representado por este valor.

Passagem dos valores dos argumento para a função

Passagem dos valores dos argumentos

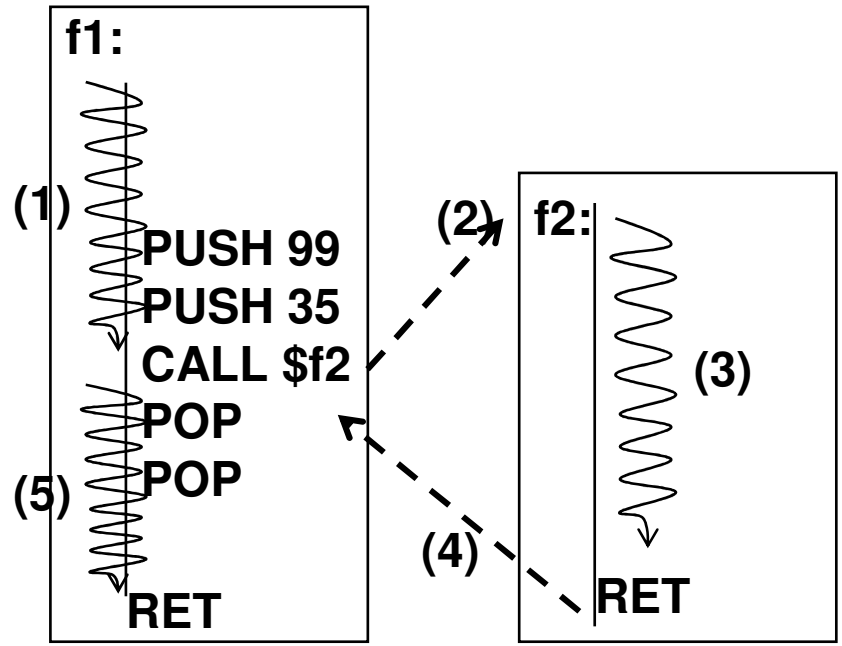
- **A pilha de execução é utilizada, também, para passagem dos argumentos da função.**

- **Os valores dos argumentos são inseridos na pilha de execução antes da ativação da instrução CALL.**

Passagem dos valores dos argumentos

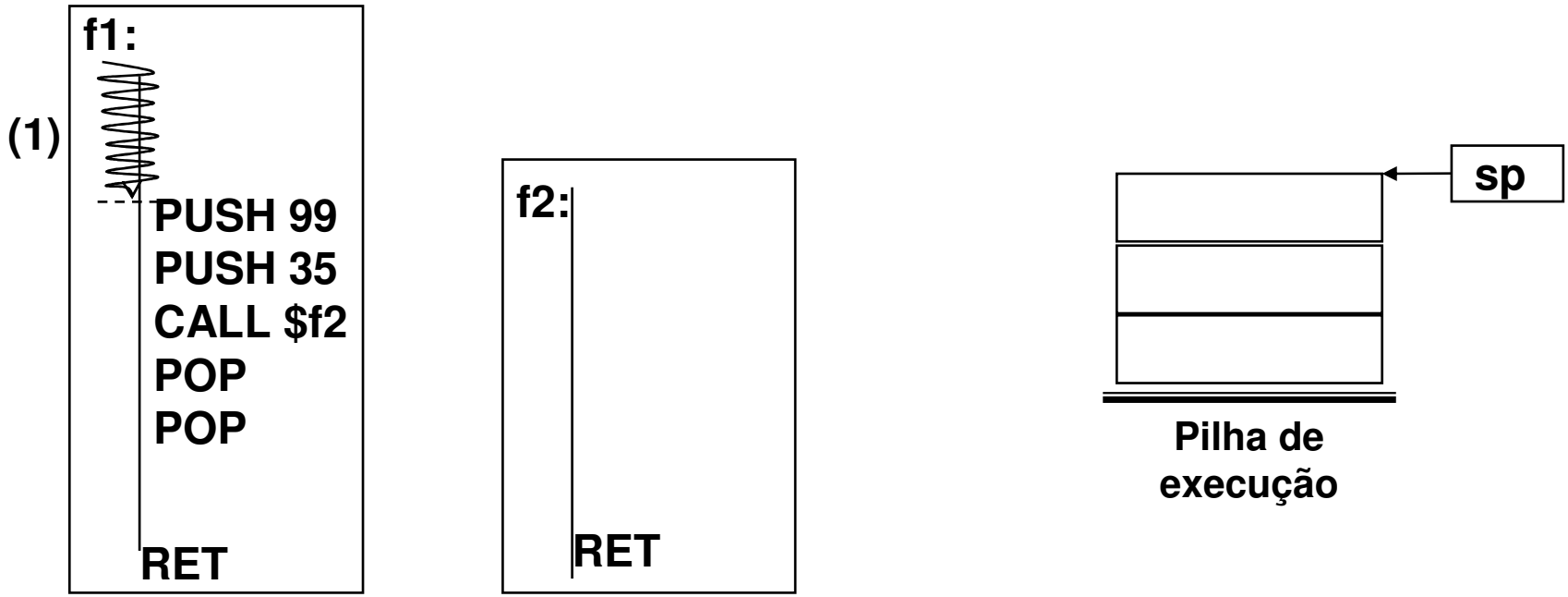
- **Exemplo**

```
void f2(int a, int b)
     {
     ...
     }

int f1()
     {
     ...
     f2(35,99);
     ...
     }
```



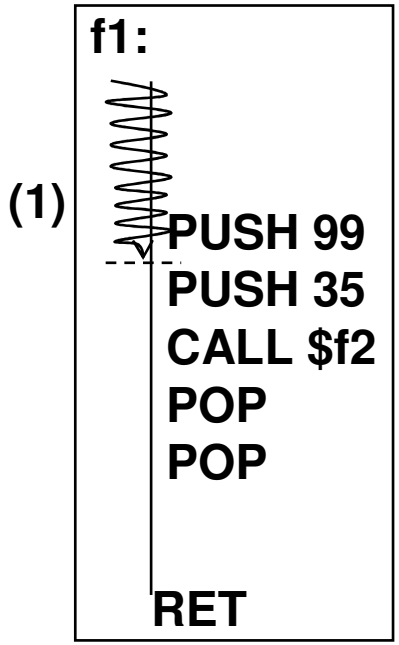
Passagem dos valores dos argumentos

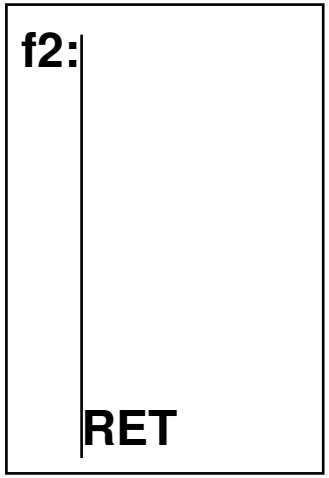
- Exemplo

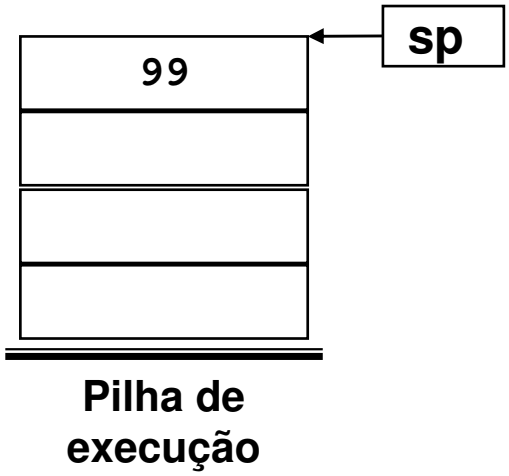


Passagem dos valores dos argumentos

- Exemplo

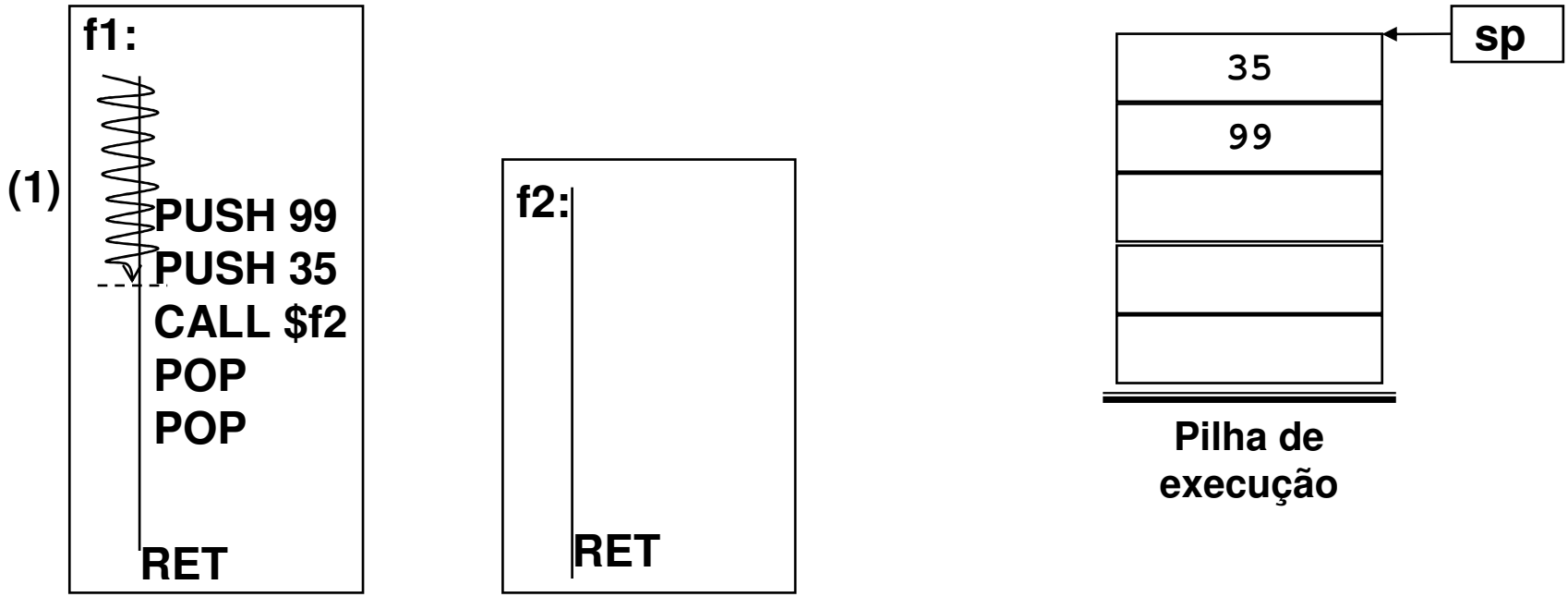






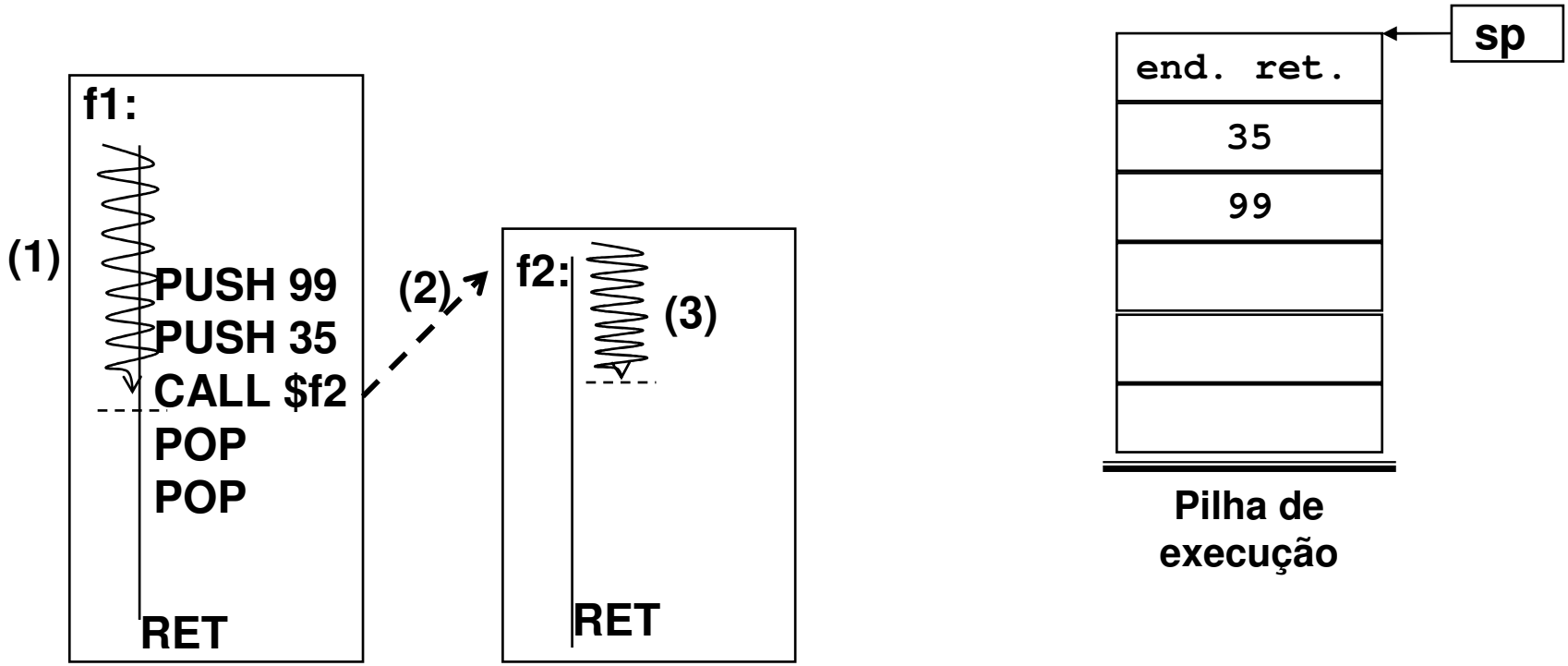
Passagem dos valores dos argumentos

- **Exemplo**



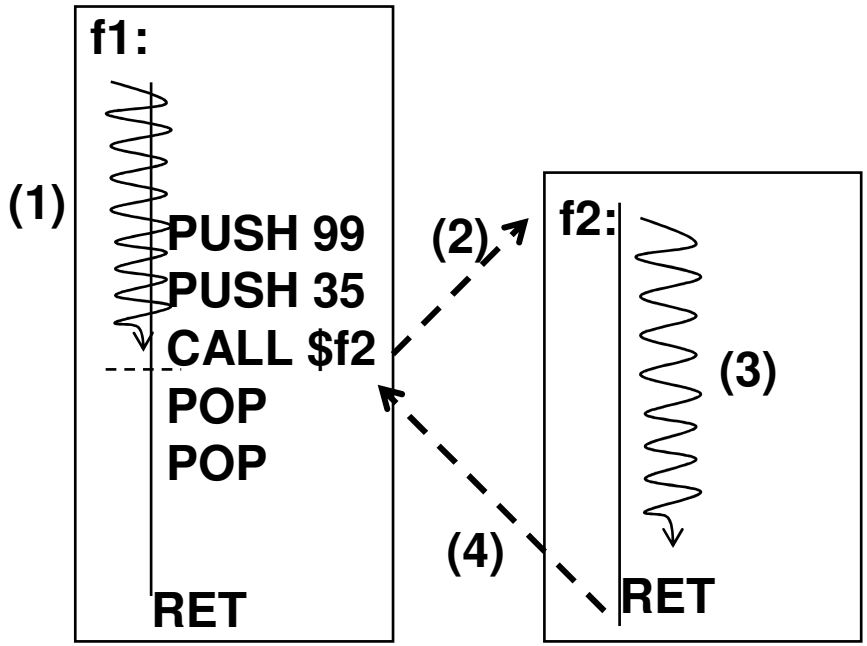
Passagem dos valores dos argumentos

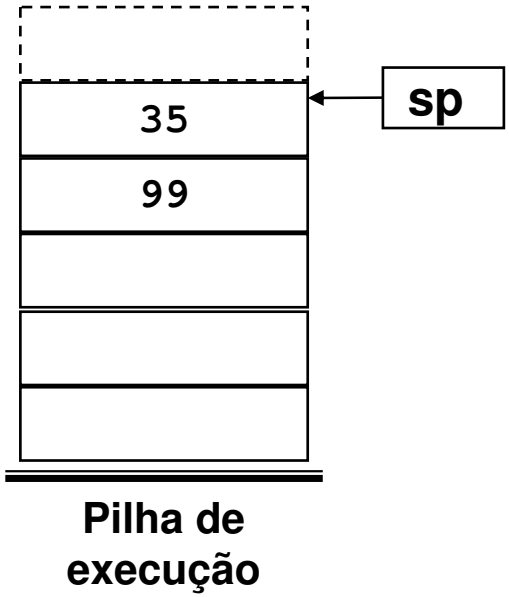
- **Exemplo**



Passagem dos valores dos argumentos

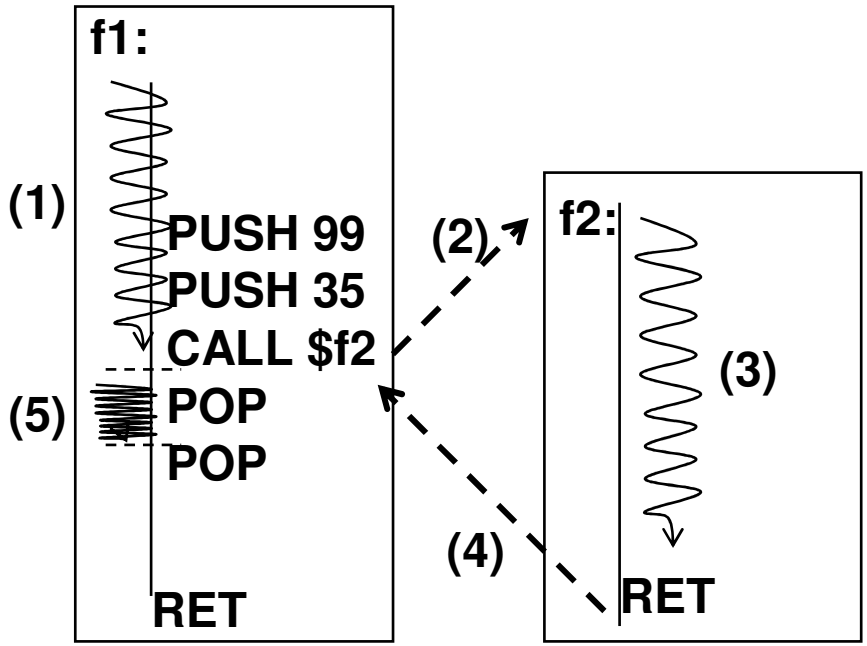
- **Exemplo**

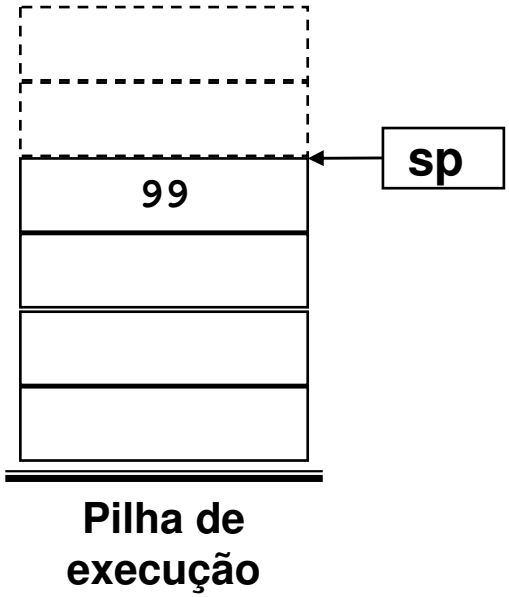




Passagem dos valores dos argumentos

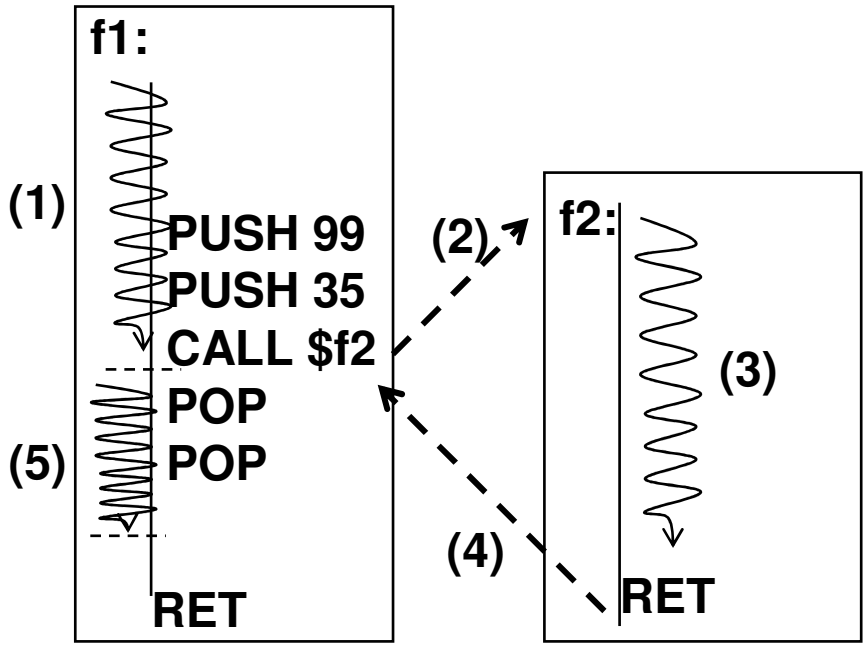
- **Exemplo**

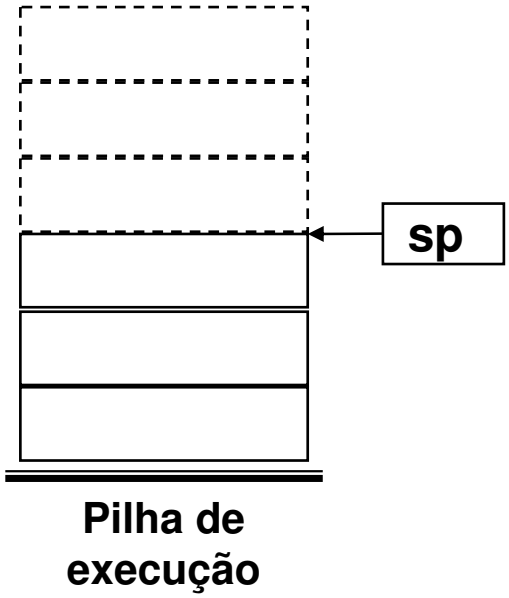




Passagem dos valores dos argumentos

- **Exemplo**





Alocação de variáveis locais

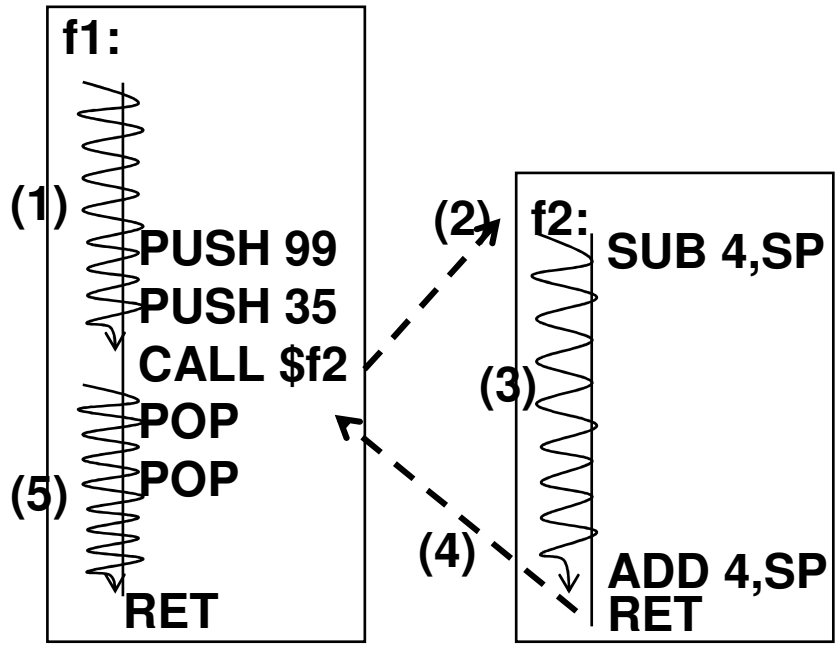
Alocação de variáveis locais

- Variáreis locais também são alocadas na pilha de execução.
- As variáveis locais de uma função ficam alocadas no quadro da respectiva função na pilha de execução

Alocação de variáveis locais

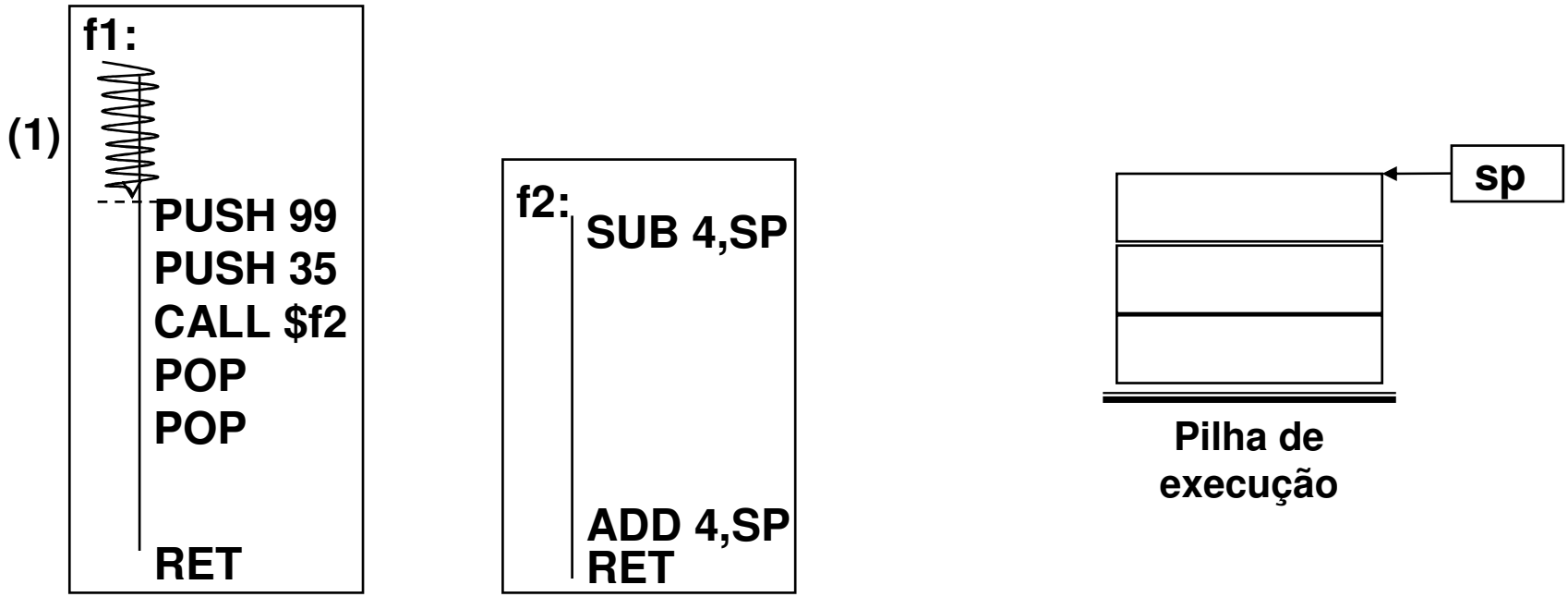
- Exemplo

```
void f2(int a, int b)
     {
     int x;
     ...
     }

int f1()
     {
     ...
     f2(35,99);
     ...
     }
```



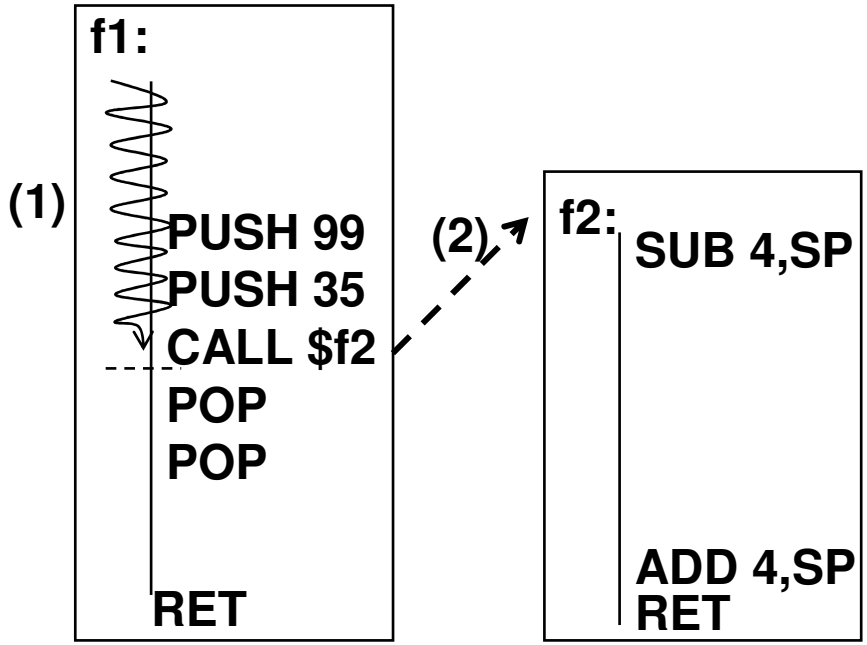
Alocação de variáveis locais

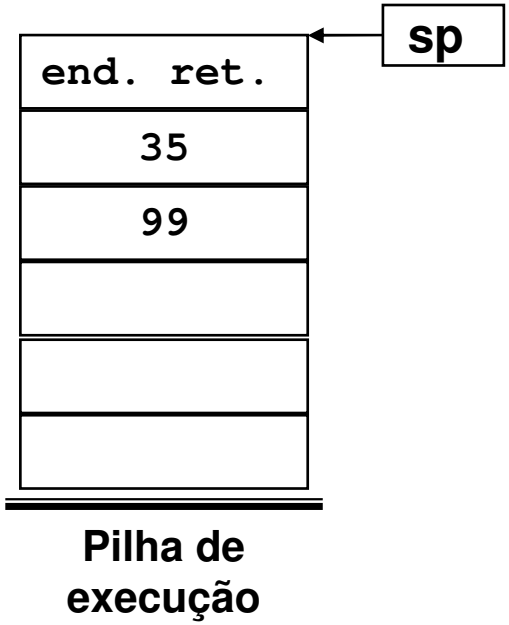
- Exemplo



Alocação de variáveis locais

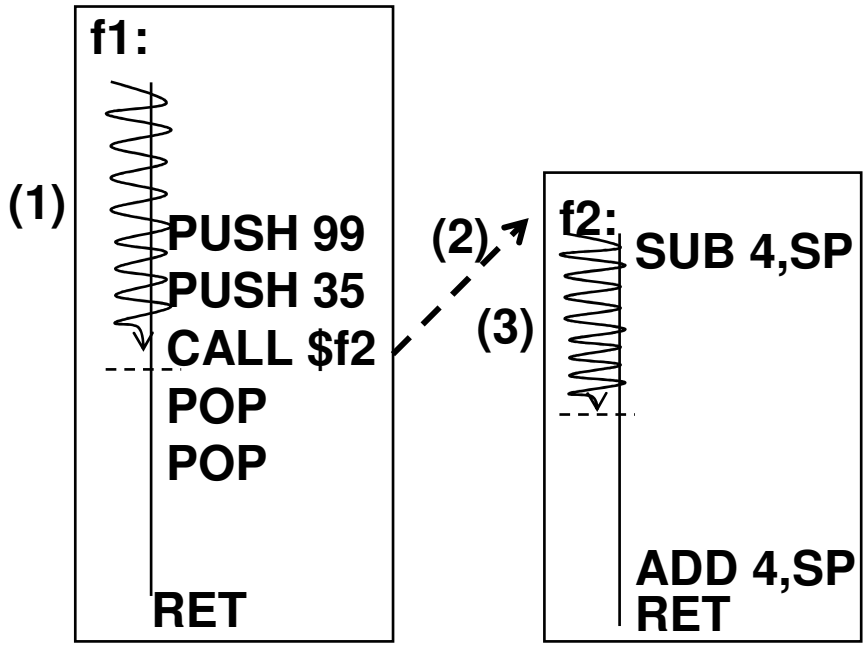
- Exemplo

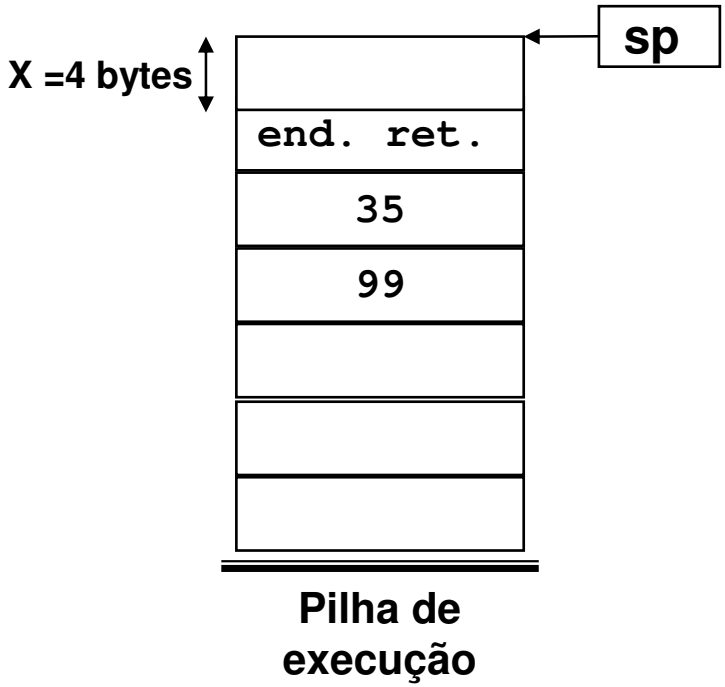




Alocação de variáveis locais

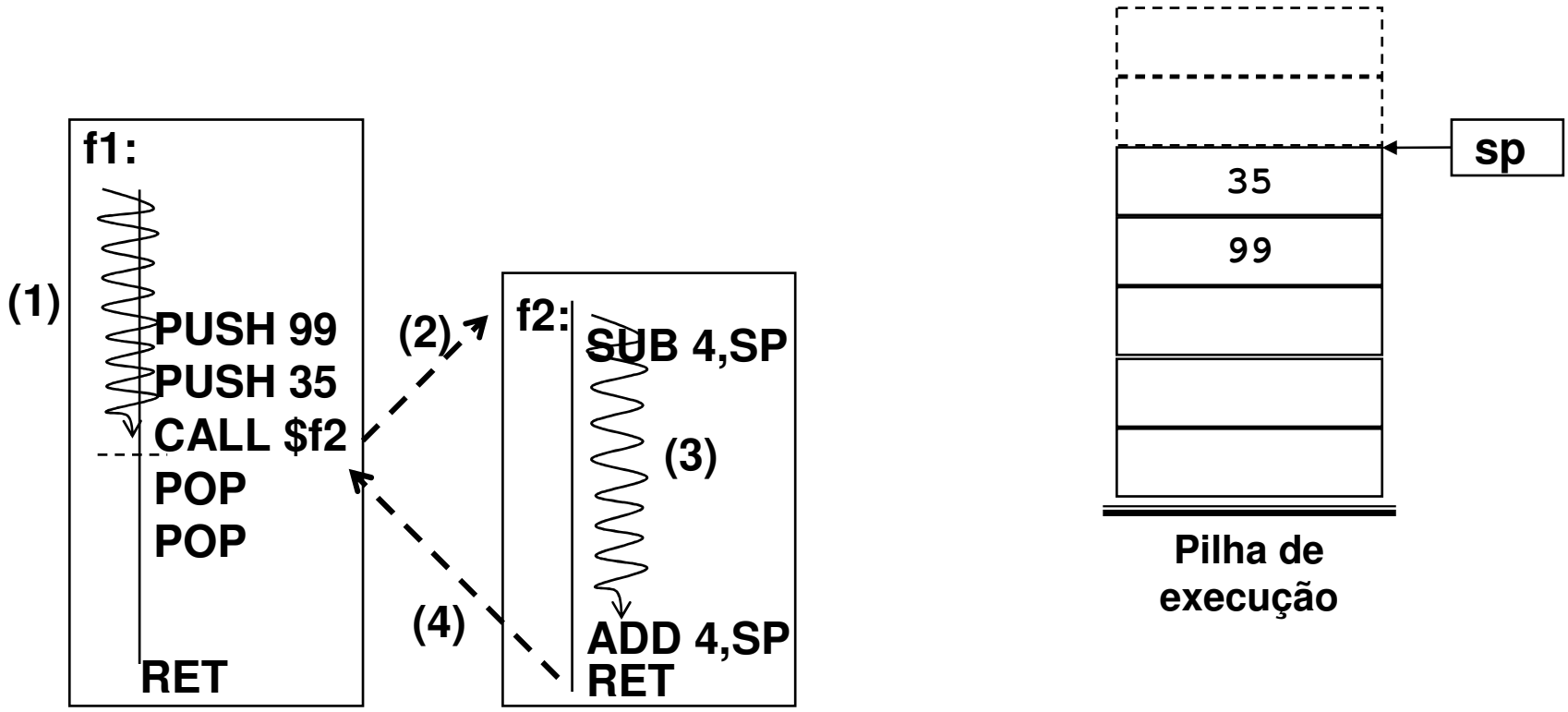
- **Exemplo**





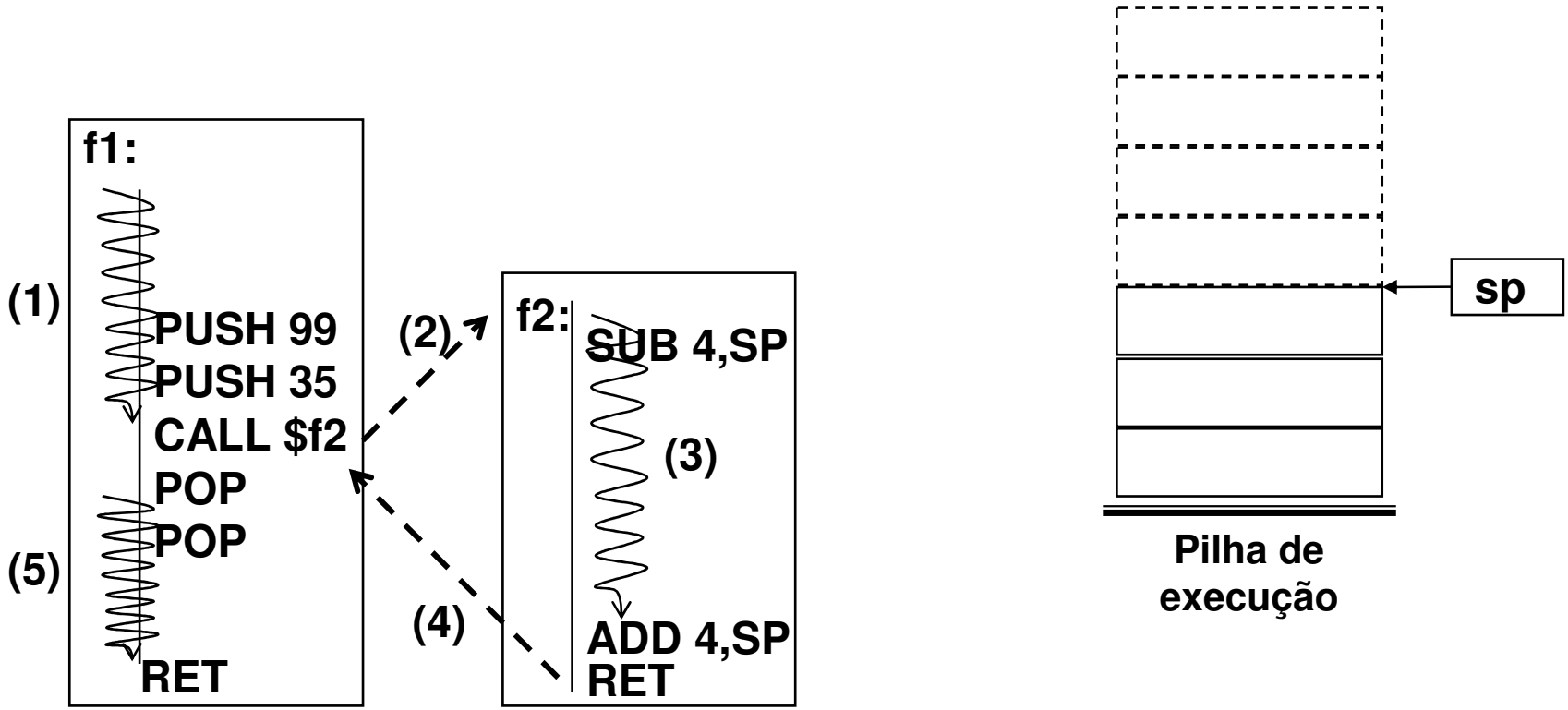
Alocação de variáveis locais

- **Exemplo**



Alocação de variáveis locais

- Exemplo

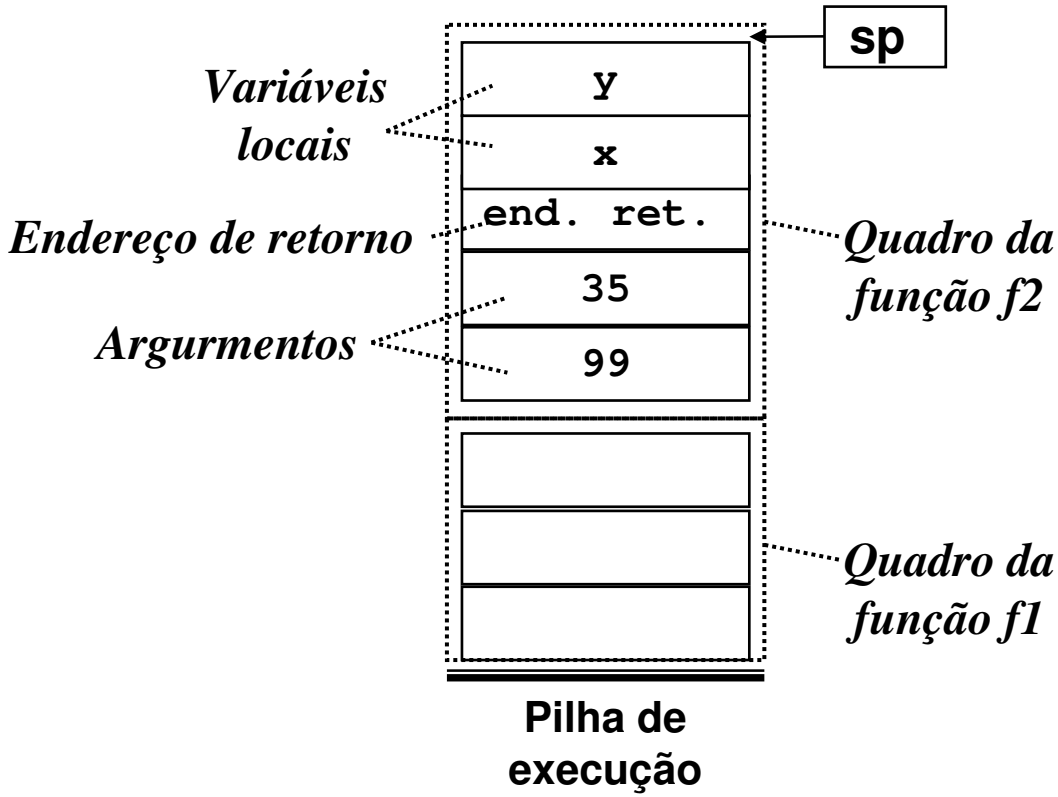


Quadro da pilha de execução

Quadro da pilha de execução

- **Exemplo de quadro da pilha**

```
void f2(int a, int b)
     {
     int x;
     int y;
     ...
     }

int f1()
     {
     ...
     f2(35,99);
     ...
     }
```



Exercício

Exercício

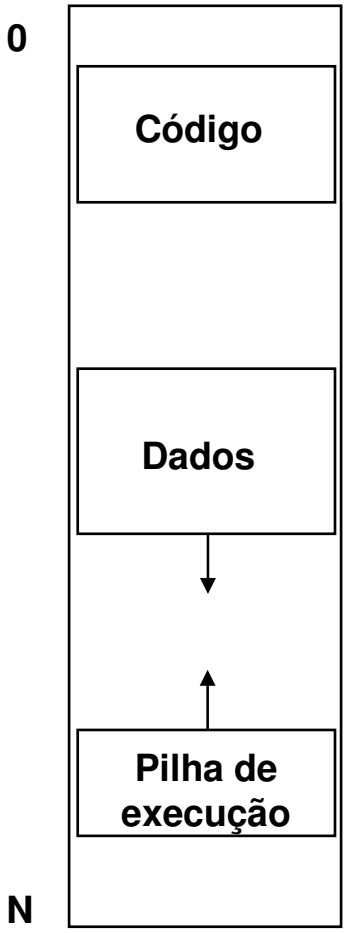
(1) Mostre graficamente a evolução da área de dados e da pilha de execução decorrente da execução do programa perímetro.c.

Exercício

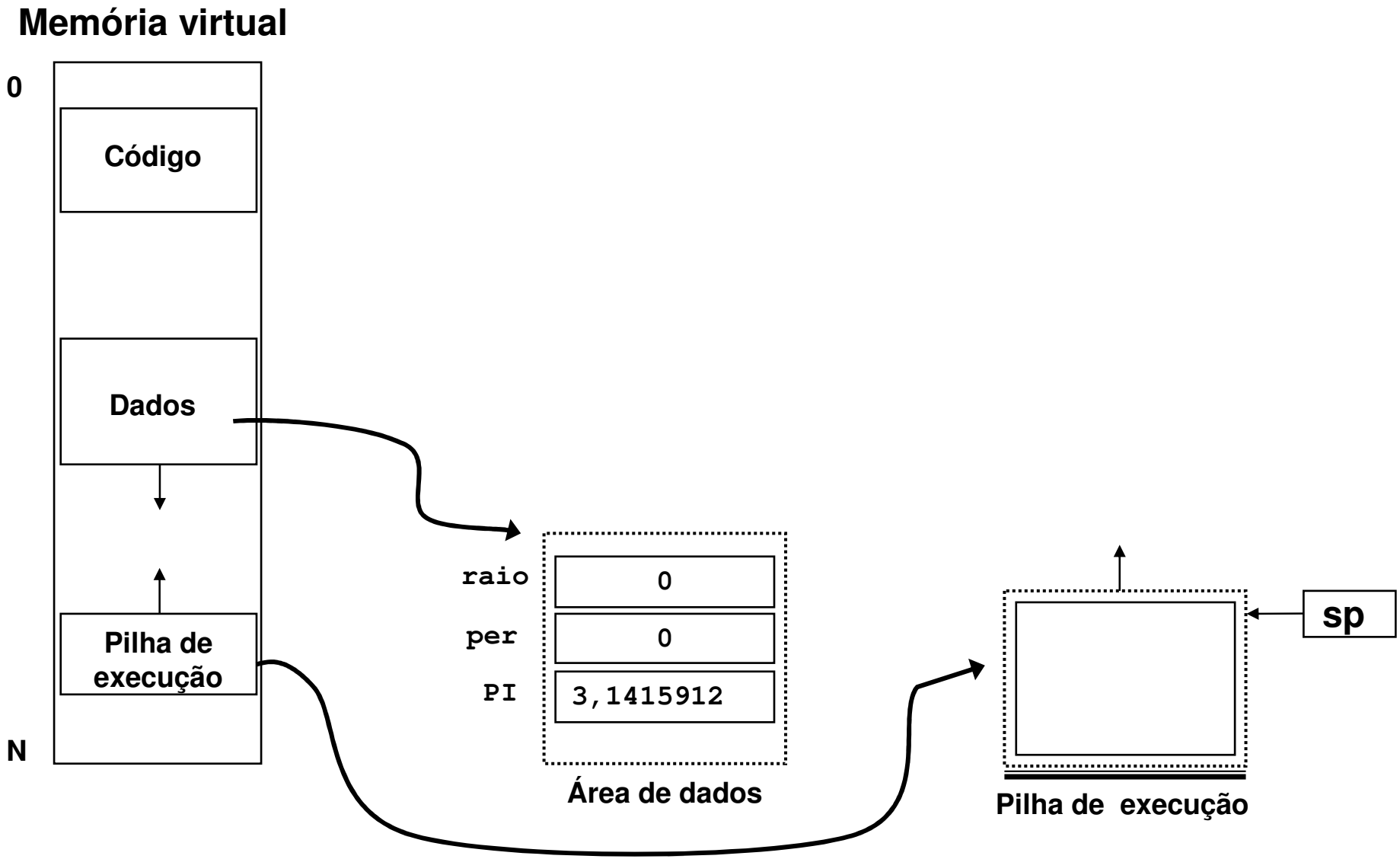
```
// Programa perimetro.c
// Calcula o perímetro de uma circunferencia

#include <stdio.h>

float       raio;
float       per;
const float pi = 3.1415912;

float perimetro(float r)
  {
  float p; /* perimetro */

  p = 2 * pi * r;
  return(p);
  }

int main()
  {
  printf("Entre com o valor do raio: ");
  scanf("%f",&raio);
  per = perimetro(raio);
  printf("Perímetro: %3.2f \n", per);
  }
```

Exercício

Memória virtual



Exercício


Memória virtual
0
Código
Dados
Pilha de execução
N
raio
0
per
0
PI
3,1415912
Área de dados
sp
Pilha de execução

Exercício

(2) Mostre graficamente a evolução da área de dados e da pilha de execução decorrente da execução do programa "fatorial" para o cálculo de fatorial de 3.

Exercício

```
#include <stdio.h>
char versao[] = "2.1";
int n;
int resultado;

int fatorial (int x)
  {
  int y;

  if (x <= 1)
    y = 1;
  else
    y = x * fatorial(x-1);
  return(y);
  }

int main(int argc, char **argv)
  {
  printf("Programa fatorial, versao %s \n", versao);
  printf("Entre com o valor: " );
  scanf("%d",&n);
  resultado = fatorial(n);
  printf("Resultado: %d \n",resultado);
  }
```

Controle do quadro da pilha de execução na arquitetura Intel Pentium

Controle do quadro da pilha de execução

- **Exemplo - Processador Intel Pentium**

  - **Registradores especiais:**
    - Registrador ESP: contém o endereço do topo da pilha
    - Registrador EBP: contém a base do quadro

  - **Sentido do crescimento da pilha**
    - Por motivos históricos, a pilha geralmente cresce em direção aos endereços menores de memória.
    - Assim, para alocar espaço para um endereço na pilha, devemos subtrair 4 de ESP no Pentium (um endereço no Intel Pentium ocupa 4 bytes!). Para desalocar devemos somar 4 ao ESP.

Controle do quadro da pilha de execução

- **Arquitetura Intel Pentium**

  - **Registrador ebp**
    - O registrador ebp é utilizado como referência para o quadro de ativação corrente
    - O código gerado por um compilador na execução de uma chamada de função começa com:

```
pushl %ebp
movl  %esp,%ebp
```

    - E termina com:

```
movl %ebp,%esp
popl %ebp
```

Controle do quadro da pilha de execução

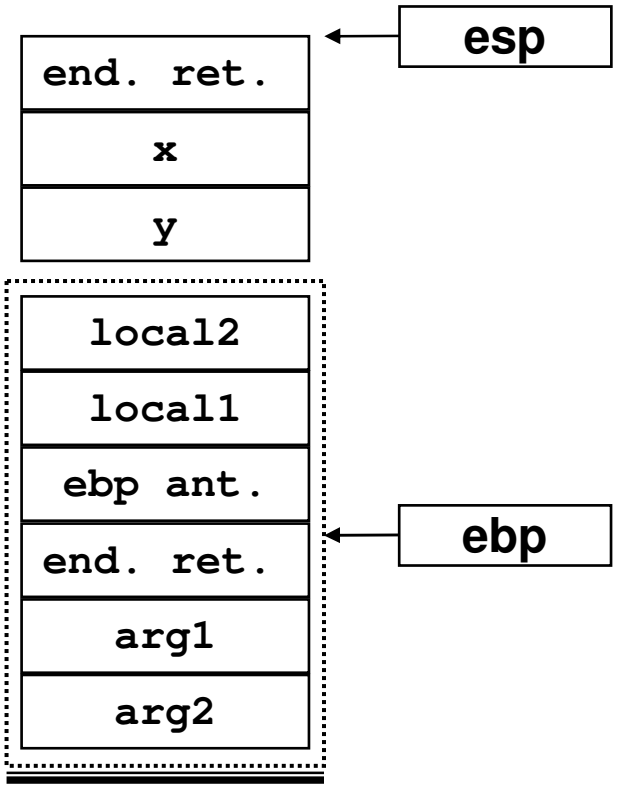
Exemplo: Arquitetura Intel Pentium

```
void troca (int *x, int *y)
    {
    int tmp;

    tmp = *x;
    *x = *y;
    *y = tmp;
    }

troca: push %ebp
       mov  %esp, %ebp
       sub  $4, %esp          /* reserva espaço na pilha para tmp */
       mov  8(%ebp), %eax     /* 1o parâmetro: endereço de x */
       mov  (%eax), %edx      /* pega valor de x */
       mov  %edx, -4(%ebp)    /* tmp = *x */
       mov  12(%ebp), %ebx    /* 2o parâmetro: endereço de y */
       mov  (%ebx), %edx      /* pega valor de y */
       mov  %edx, (%eax)      /* *x = *y */
       mov  -4(%ebp), %edx    /* leitura do valor de tmp */
       mov  %edx, (%ebx)      /* *y = tmp */
       mov  %ebp, %esp
       pop  %ebp
       ret
```

Controle do quadro da pilha de execução

```
troca: push   %ebp
       mov    %esp ,   %ebp
       sub    $4   ,   %esp
       mov  8(%ebp),   %eax
       mov   (%eax),   %edx
       mov    %edx ,-4(%ebp)
       mov 12(%ebp),   %ebx
       mov   (%ebx),   %edx
       mov    %edx ,  (%eax)
       mov -4(%ebp),   %edx
       mov    %edx ,  (%ebx)
       mov    %ebp ,   %esp
       pop    %ebp
       ret
```

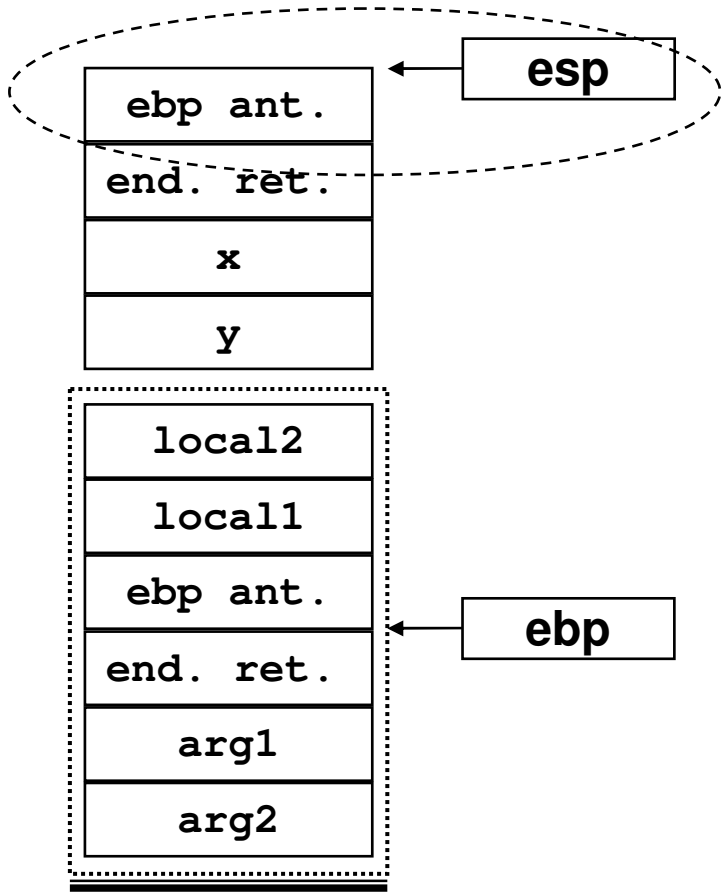
Exemplo: Arquitetura Intel Pentium



Controle do quadro da pilha de execução

```
troca: push   %ebp
       mov    %esp ,   %ebp
       sub    $4   ,   %esp
       mov  8(%ebp),   %eax
       mov   (%eax),   %edx
       mov    %edx ,-4(%ebp)
       mov 12(%ebp),   %ebx
       mov   (%ebx),   %edx
       mov    %edx ,  (%eax)
       mov -4(%ebp),   %edx
       mov    %edx ,  (%ebx)
       mov    %ebp ,   %esp
       pop    %ebp
       ret
```

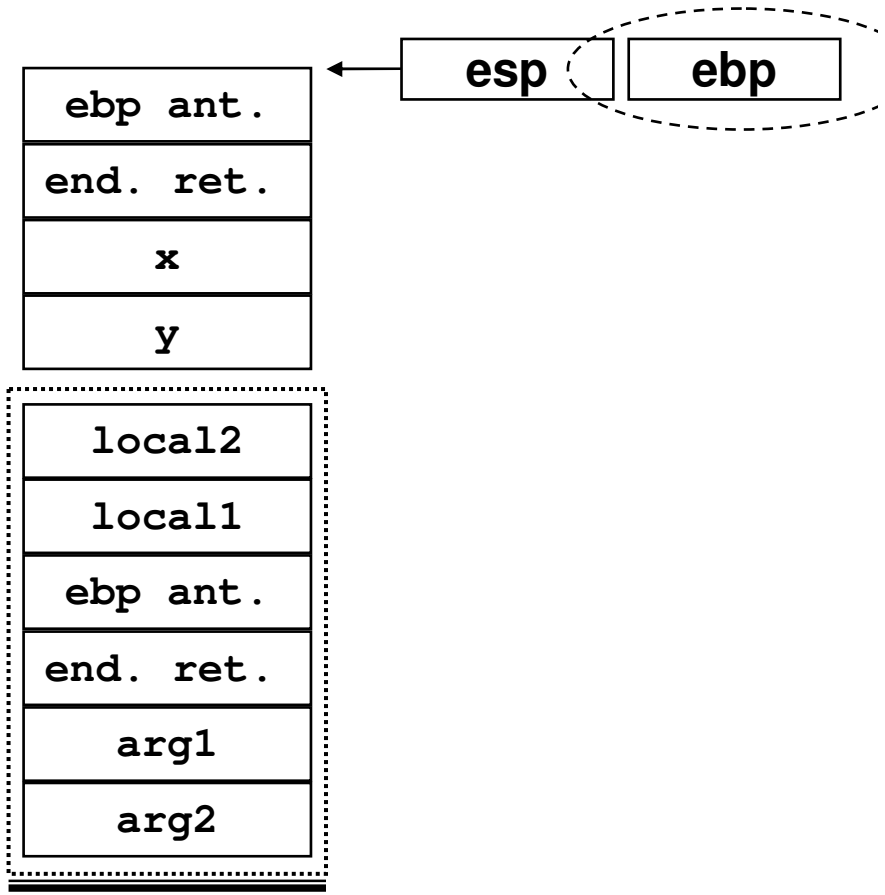
Exemplo: Arquitetura Intel Pentium



Controle do quadro da pilha de execução

```
troca: push   %ebp
       mov    %esp , %ebp
       sub    $4   , %esp
       mov  8(%ebp), %eax
       mov   (%eax), %edx
       mov    %edx ,-4(%ebp)
       mov 12(%ebp), %ebx
       mov   (%ebx), %edx
       mov    %edx , (%eax)
       mov -4(%ebp), %edx
       mov    %edx , (%ebx)
       mov    %ebp , %esp
       pop    %ebp
       ret
```

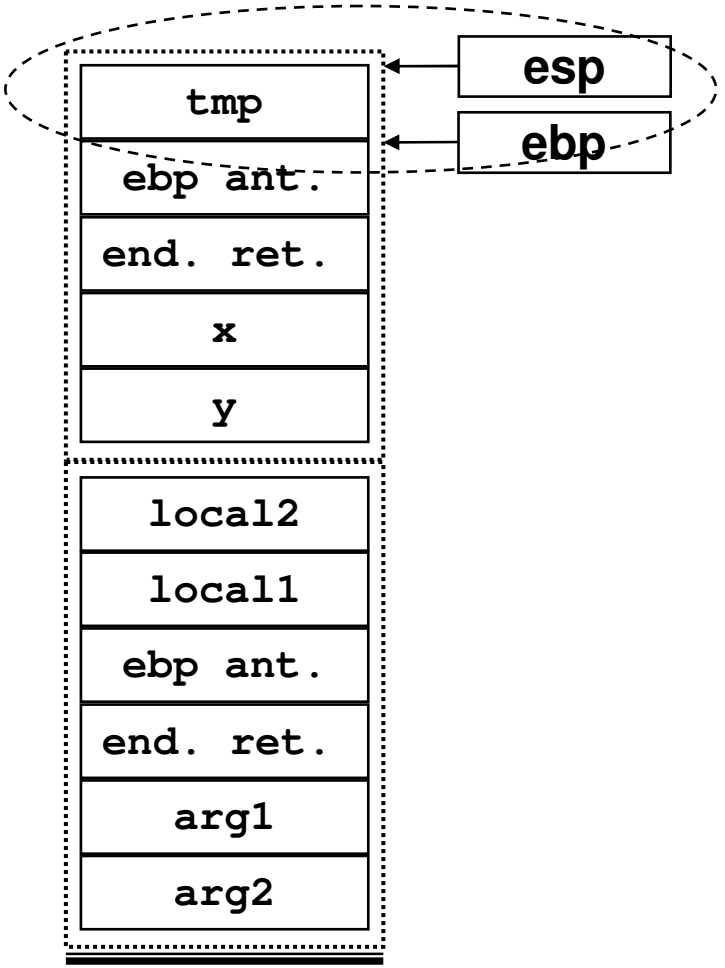
Exemplo: Arquitetura Intel Pentium



Controle do quadro da pilha de execução

Exemplo: Arquitetura Intel Pentium

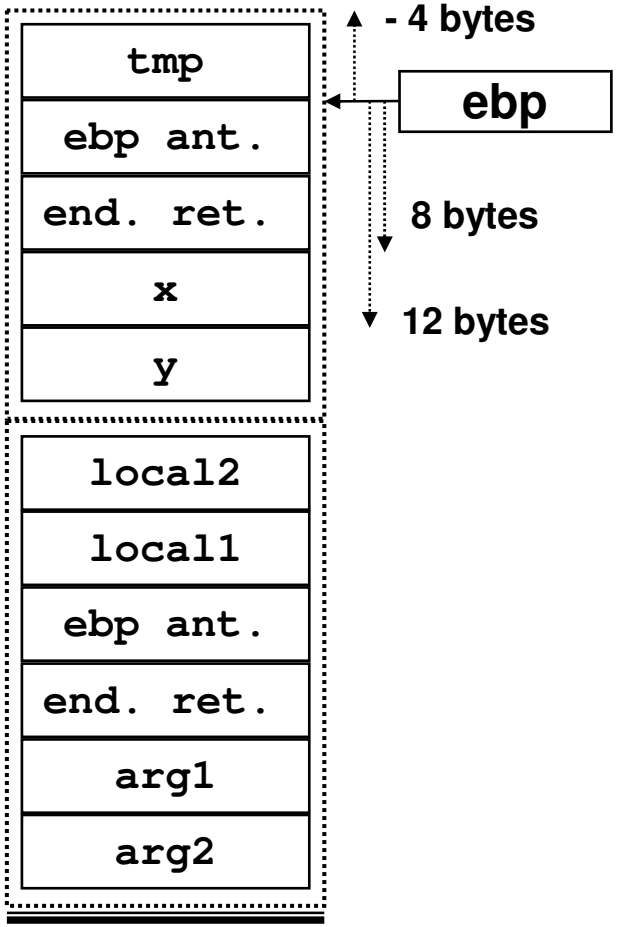
```
troca: push   %ebp
       mov    %esp , %ebp
       sub    $4   , %esp
       mov  8(%ebp), %eax
       mov  (%eax) , %edx
       mov    %edx ,-4(%ebp)
       mov 12(%ebp), %ebx
       mov  (%ebx) , %edx
       mov    %edx , (%eax)
       mov -4(%ebp), %edx
       mov    %edx , (%ebx)
       mov    %ebp , %esp
       pop    %ebp
       ret
```



Controle do quadro da pilha de execução

Exemplo: Arquitetura Intel Pentium

```
Endereços:

-4(%ebp)  → variável local tmp
 8(%ebp)  → parâmetro x
12(%ebp)  → parâmetro y
```



Exercício

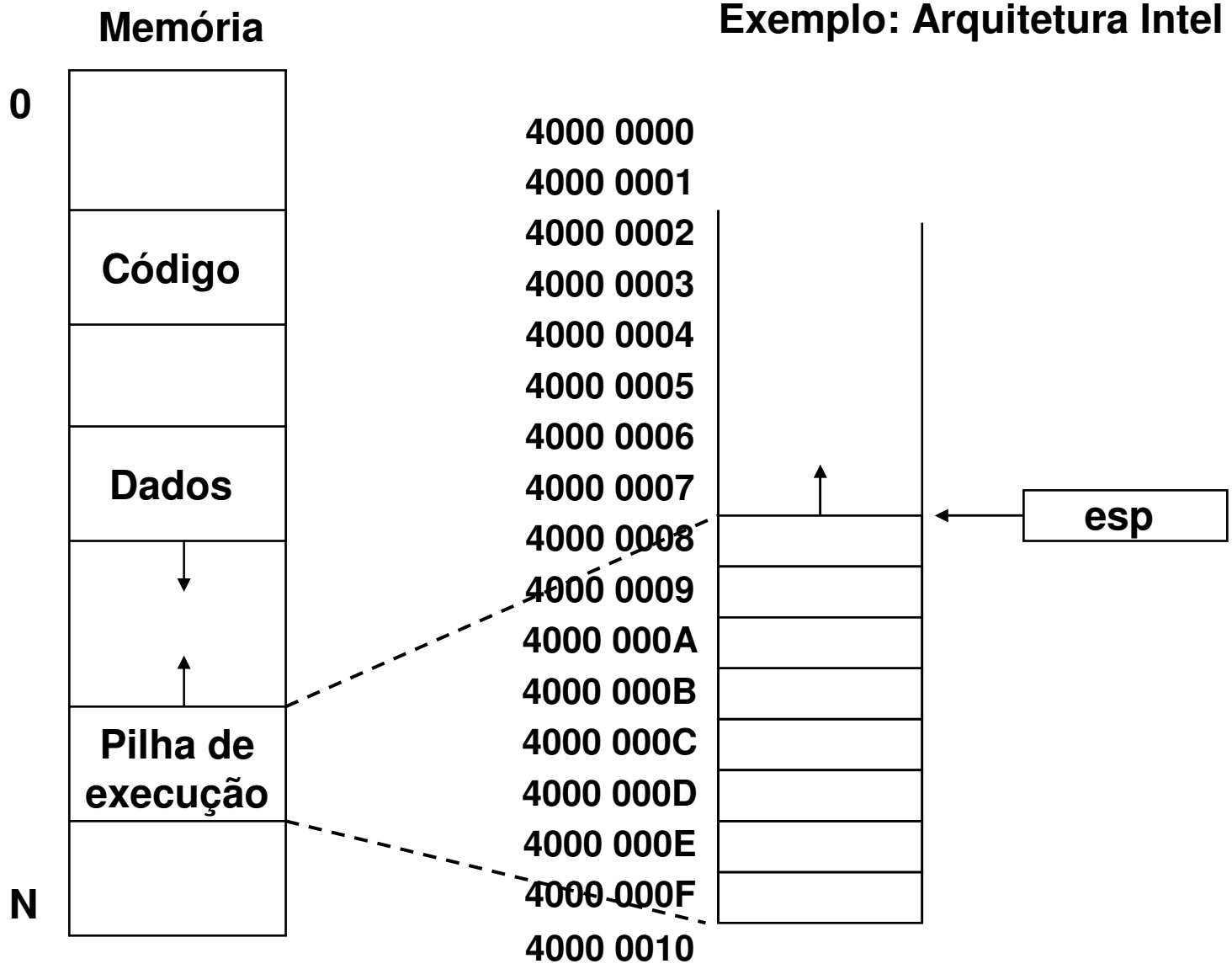
Exercício

(3) Seja a configuração da pilha em um processador Intel Pentium (*little endian*) mostrada no próximo slide.

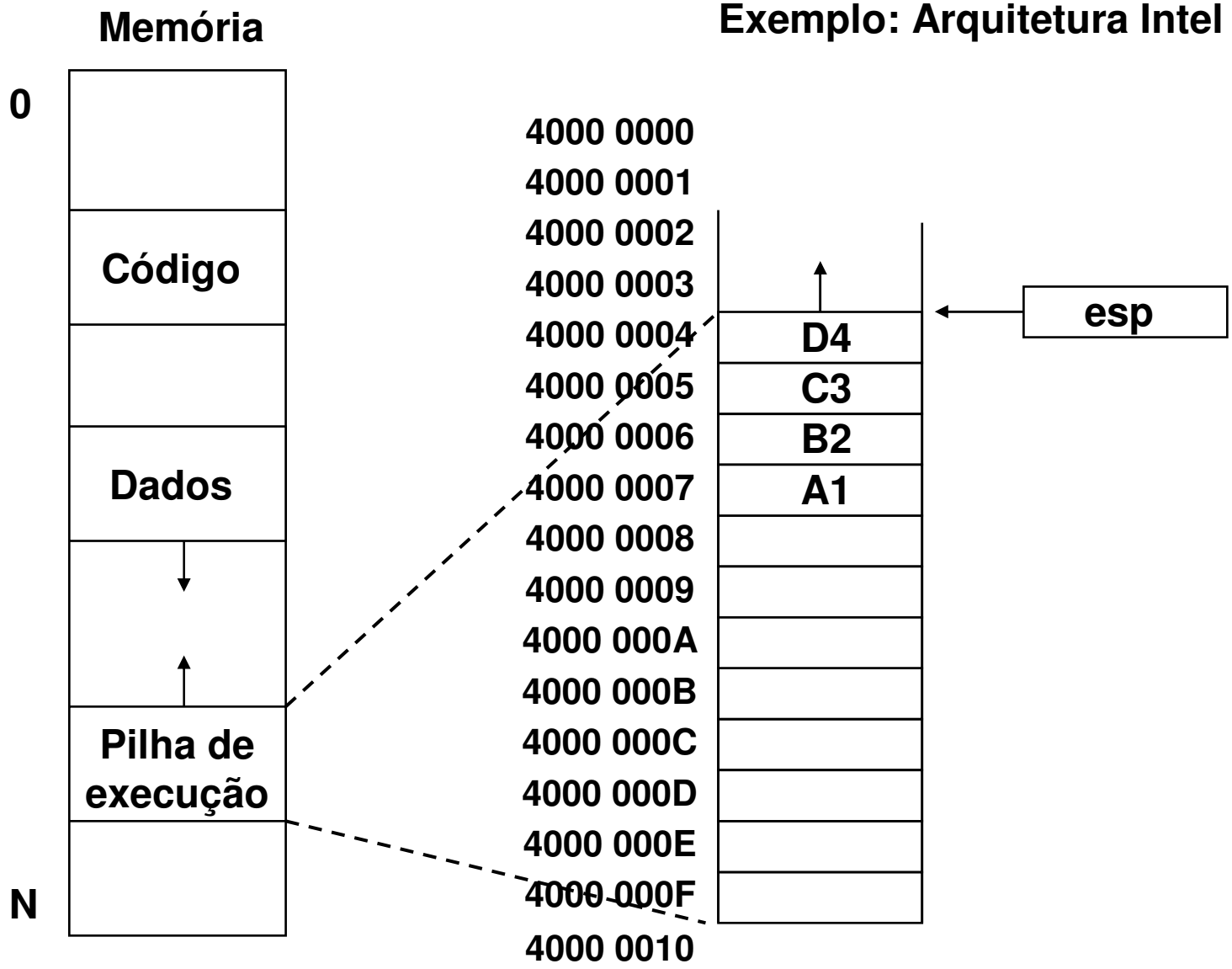
- **Suponha o valor do registrador eax = A1B2C3D4 (hex)**
- **Qual é a configuração da pilha de execução após a execução da instrução a seguir?**

pushl %eax **(empilha os 4 bytes que representam o valor contido no registrador eax)**

Exercício


Memória
Exemplo: Arquitetura Intel Pentium
0
Código
Dados
Pilha de execução
N
4000 0000
4000 0001
4000 0002
4000 0003
4000 0004
4000 0005
4000 0006
4000 0007
4000 0008
4000 0009
4000 000A
4000 000B
4000 000C
4000 000D
4000 000E
4000 000F
4000 0010
esp

Exercício

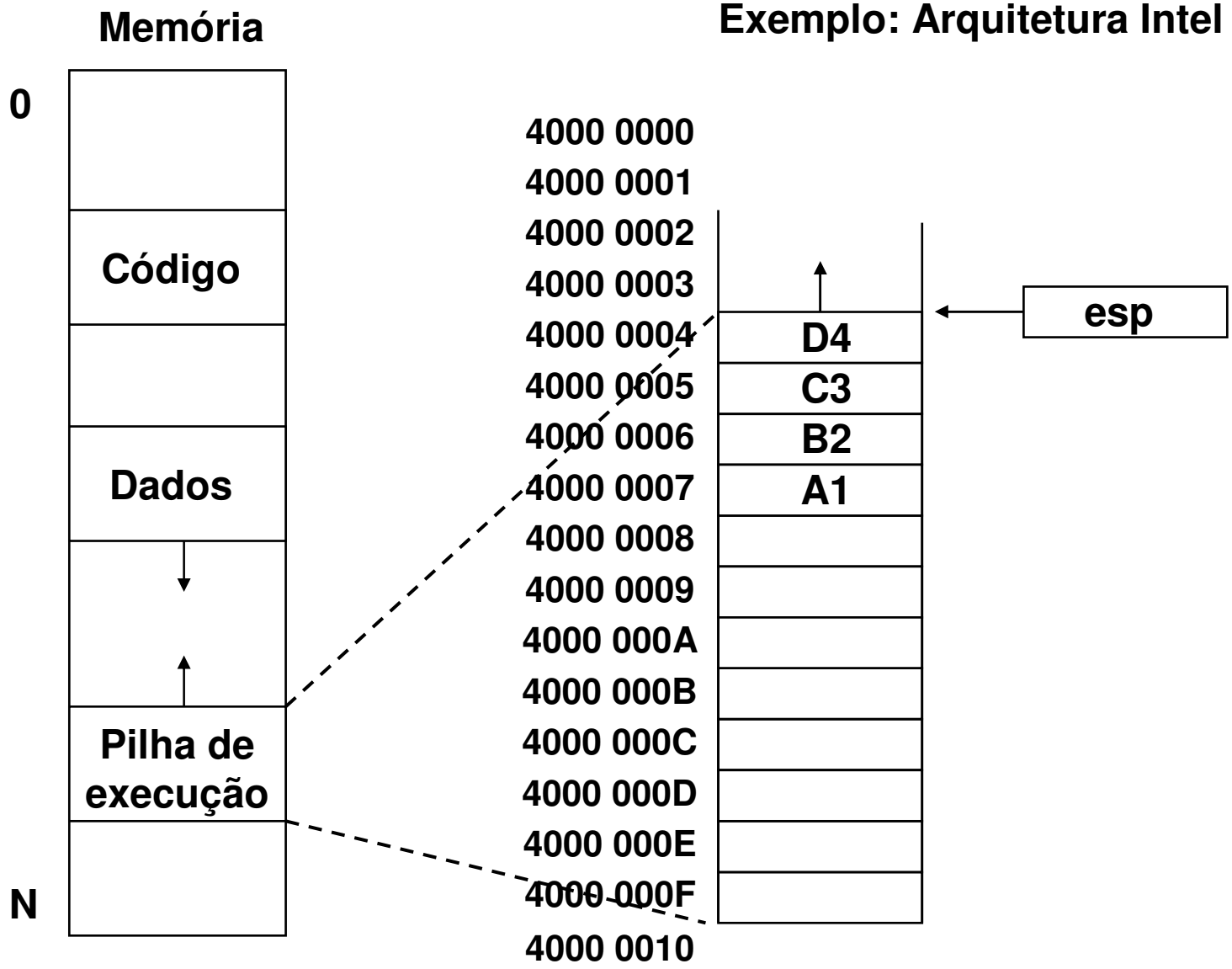

Memória
Exemplo: Arquitetura Intel Pentium
0
Código
Dados
Pilha de execução
N
4000 0000
4000 0001
4000 0002
4000 0003
4000 0004
4000 0005
4000 0006
4000 0007
4000 0008
4000 0009
4000 000A
4000 000B
4000 000C
4000 000D
4000 000E
4000 000F
4000 0010
esp
D4
C3
B2
A1

Exercício

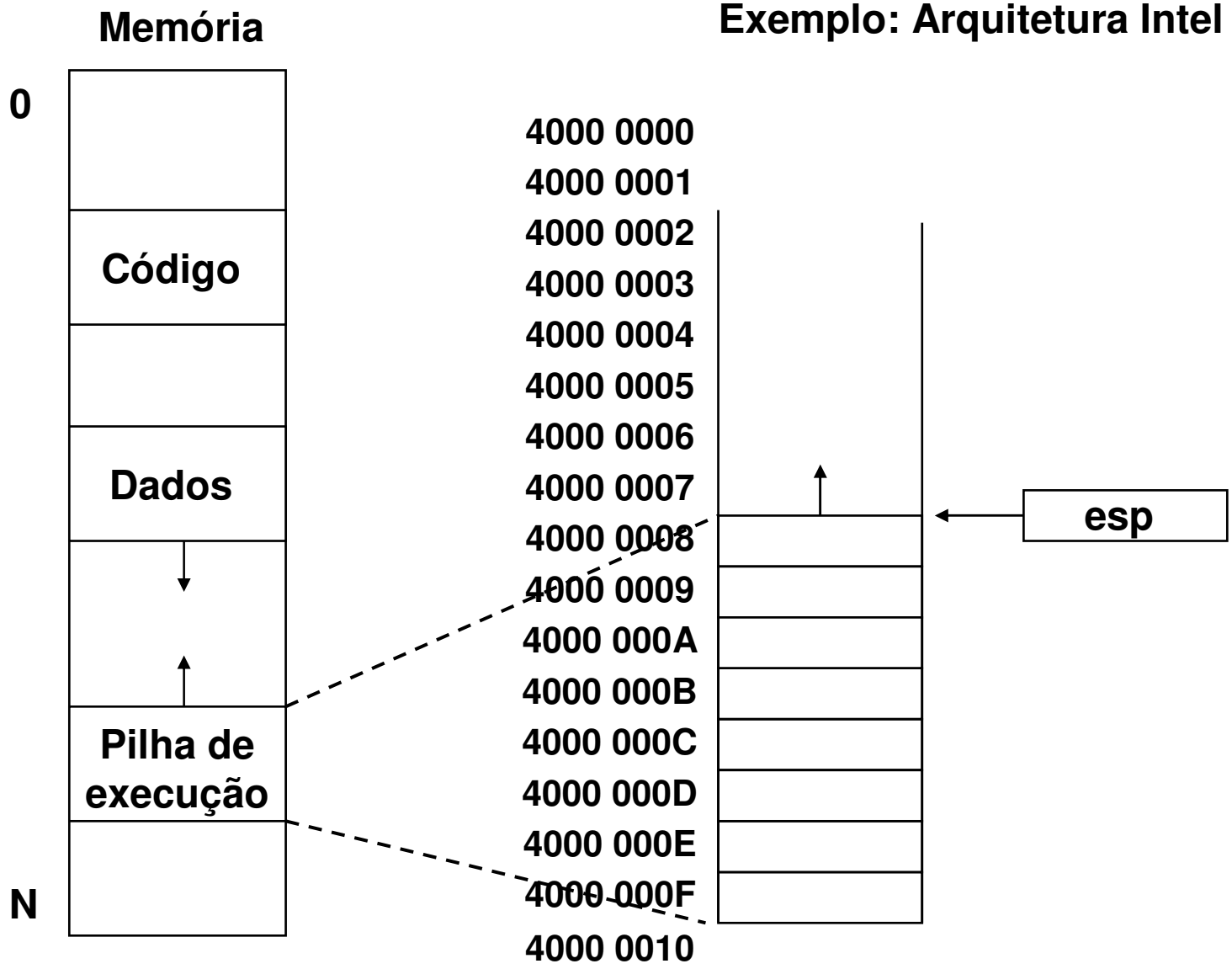
(4) Em relação ao slide anterior, qual é a configuração da pilha de execução após a execução da seguinte instrução:

popl %eax **(desempilha 4 bytes do topo da pilha e armazena no registrador eax)**

Exercício


Memória
Exemplo: Arquitetura Intel Pentium
0
Código
Dados
Pilha de execução
N
4000 0000
4000 0001
4000 0002
4000 0003
4000 0004
4000 0005
4000 0006
4000 0007
4000 0008
4000 0009
4000 000A
4000 000B
4000 000C
4000 000D
4000 000E
4000 000F
4000 0010
D4
C3
B2
A1
esp

Exercício


Memória
Exemplo: Arquitetura Intel Pentium
0
Código
Dados
Pilha de execução
N
4000 0000
4000 0001
4000 0002
4000 0003
4000 0004
4000 0005
4000 0006
4000 0007
4000 0008
4000 0009
4000 000A
4000 000B
4000 000C
4000 000D
4000 000E
4000 000F
4000 0010
esp